

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny

The Power Plant Mill Wheel Run-up Analysis

Student:

Pavel Pergler

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Pergler**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny**
The Power Plant Mill Wheel Run-up Analysis
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod, popis technologie.
2. Popis soustavy pohonu mlecího kola.
3. Analýza rozběhu naprázdno, výpočtový model.
4. Analýza rozběhu mlecího kola, výpočtový model.
5. Rozbor výsledků numerického řešení.
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Brousil, J., Slavík, J., Zeman, V. : Dynamika. SNTL, Praha, 1989.
- [2] Juliš, K., Brepta, R. : Mechanika II. díl, Dynamika. SNTL, Praha, 1987.
- [3] Vinogradov, O. : Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms. CRC Press, London, 2000.

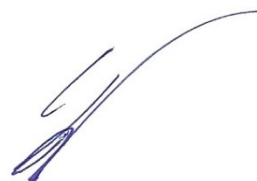
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016
Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5. 2017

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít. (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Pergler

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Proskovická 556, Krmelín

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PERGLER, P. *Analýza rozběhu mlecího kola elektrárny : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2017, 59 s. Vedoucí práce: Podešva, J.

Bakalářská práce se zabývá analýzou rozběhu soustavy mlecího kola elektrárny. V úvodu je popsán princip uhelné elektrárny a význam samotné soustavy v jejím celku. Dále je popsáno složení soustavy a popis hydrodynamické spojky, která je předmětem analýzy. Analýza je rozdělena do dvou výpočtů a to „rozběh na prázdko“, kde je vypočten rozběh elektromotoru, který pohání soustavu, a „rozběh mlecího kola“, který se odvíjí od funkce hydrodynamické spojky. Cílem práce je stanovit rychlost naplňování hydrodynamické spojky tak, aby rozběh soustavy byl co nejkratší a zároveň pohon soustavy se pohyboval v pracovní oblasti své momentové charakteristiky.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PERGLER, P. *The power plant mill wheel run-up analysis : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2017, 59 p. Thesis head: Podešva, J.

The object of bachelor thesis is run-up analysis of the mill wheel system. In the beginning there is description of coal power plant and purpose of the mill wheel system in power plant. Further in thesis there is description of the system composition and hydrodynamic coupling, which is the main subject of the thesis. The analysis is divided into two calculations. Firstly there is run-up of electric motor, which propels the system, followed by run-up of the whole system, which mainly depends on the function of the hydrodynamic coupling. The thesis aims to determine a filling speed of the hydrodynamic coupling so the run-up time will be the shortest possible and also electric motor will operate in operational zone of its torque characteristic.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
1. Úvod	11
2. Popis soustavy pohonu mlecího kola	13
2.1 Pružná hřídelová spojka	15
2.2 Hydrodynamická spojka	15
3. Analýza rozběhu na prázdnou	19
3.1 Přibližný výpočet	19
3.2 Nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy	22
3.2.1 Aproximace charakteristiky motoru	26
3.2.2 Numerický výpočet doby rozběhu	32
4. Analýza rozběhu mlecího kola	36
4.1 Dvouhmotový výpočtový model	36
4.1.1 Soustava „pohon“	37
4.1.2 Soustava „mlecí kolo“	37
4.2 Příklad ustáleného běhu	39
4.3 Přechodový děj	40
4.4 Limit rozběhu	43
4.5 Výpočet přechodového děje	44
5. Rozbor výsledků numerického řešení	49
6. Závěr	53
7. Seznam použité literatury	55

8. Seznam příloh.....	57
Poděkování.....	58
Přílohy	59

Seznam použitých značek a symbolů

a, b, c, d	$[-]$	Koeficienty polynomu
f	$[-]$	Funkce
h	$[-]$	Délka kroku
I_C	$[kg \cdot m^2]$	Celkový moment setrvačnosti
I_{CMK}	$[kg \cdot m^2]$	Celkový moment setrvačnosti na straně mlecího kola
I_{HS1}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti vstupního oběžného kola hydrodynamické spojky
I_{HS2}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti vstupního oběžného kola hydrodynamické spojky
I_M	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti motoru
I_{MK}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti mlecího kola
I_{MKSP}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti mlecího kola redukováný na výstupní hřídel hydrodynamické spojky
$I_{O1/2}$	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti poloviny olejové náplně
I_{PR}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti převodovky
I_{PS}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti pružné hřídelové spojky
i	$[-]$	Převod
k_1, k_2, k_3, k_4	$[-]$	Konstanta 1, 2, 3, 4
M_{Hmax}	$[N \cdot m]$	Maximální krouticí moment
M_{HS}	$[N \cdot m]$	Krouticí moment hydrodynamické spojky

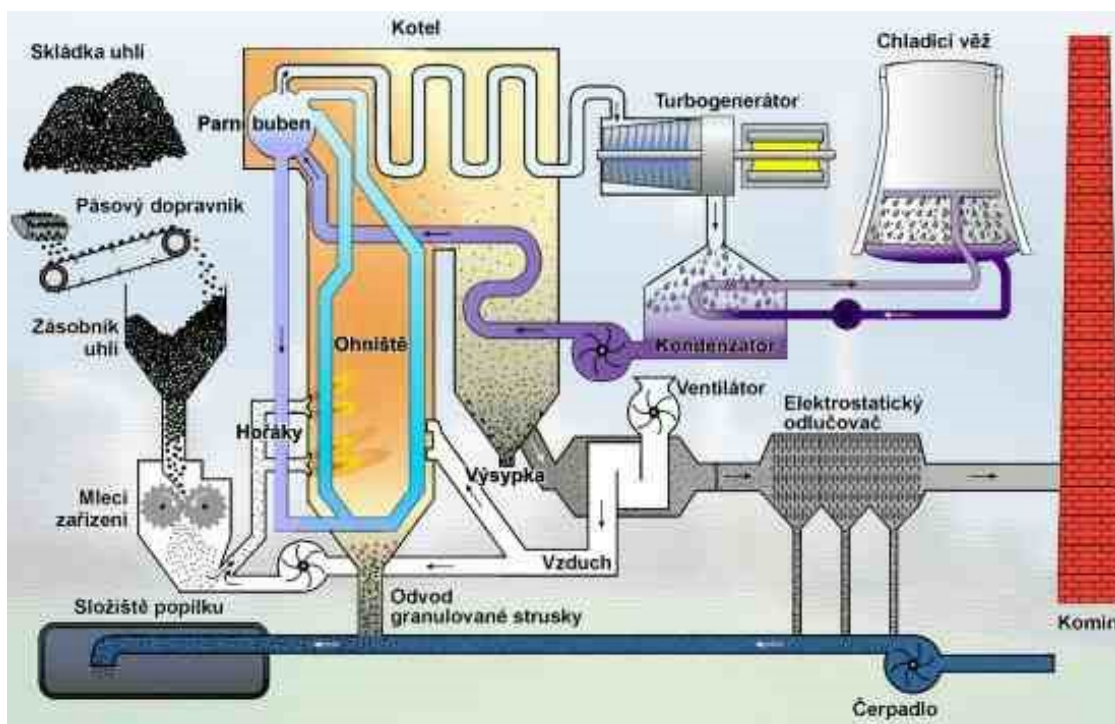
M_i	$[N \cdot m]$	Krouticí moment v obecném kroku
M_N	$[N \cdot m]$	Jmenovitý hnací moment
M_O	$[N \cdot m]$	Moment odporu proti pohybu
M_P	$[N \cdot m]$	Průměrný hnací moment
M_Z	$[N \cdot m]$	Záběrový moment
M_{ZV}	$[N \cdot m]$	Momentu zvratu
MPa		Megapascal
N_r	$[-]$	Počet otočení při rozběhu
n	$[ot/min]$	Otáčky na vstupu
n_i	$[ot/min]$	Otáčky v obecném kroku
n_N	$[ot/min]$	Jmenovité otáčky
n_v	$[ot/min]$	Otáčky na výstupu
S	$[-]$	Funkce
s	$[\%]$	Skluz
s_{zv}	$[\%]$	Skluz v bodě zvratu
$T_{1.2}$	$[s]$	Celková doba rozběhu soustavy
$T_{HS1,2}$	$[s]$	Celková doba naplňování hydrodynamické spojky
t	$[s]$	Doba plnění
t_r	$[s]$	Doba rozběhu
t_{rL}	$[s]$	Nejkratší možná doba naplnění
Δt	$[s]$	Délka časového kroku

ε	$[rad/s^2]$	Úhlové zrychlení
ε_{v_max}	$[rad/s^2]$	Maximální úhlové zrychlení
λ	$[-]$	parametr lambda
φ	$[rad]$	Úhlová dráha rozběhu
φ_0	$[rad]$	Počáteční úhlové natočení
φ_1	$[rad]$	Úhlová dráha jednoho otočení
φ_i	$[rad]$	Úhel natočení v obecném kroku
ω_0	$[rad/s]$	Počáteční úhlová rychlost
ω_i	$[rad/s]$	Úhlová rychlost v obecném kroku
ω_N	$[rad/s]$	Jmenovitá úhlová rychlost
ω_s	$[rad/s]$	Synchronní úhlová rychlost
ω_{zv}	$[rad/s]$	Úhlová rychlost v bodě zvratu
$^{\circ}C$		Celsiův stupeň

1. Úvod

Elektřina se v dnešní době stala nezbytností, jejíž přítomnost je vyžadována naprosto všude. Elektřina se vyrábí v elektrárnách přeměnou energie z určitého zdroje, čímž může být sluneční záření, vítr, voda či fosilní paliva. Nejčastěji se využívá přeměna této prvotní energie na energii mechanickou, která následně pohání elektrický generátor, a ten poté přeměňuje energii mechanickou na energii elektrickou. Podle způsobu výroby a druhu zdroje energie, ze kterého se elektřina vyrábí, dělíme elektrárny na spalovací, jaderné, vodní, solární a další.

K výrobě elektrické energie se nejčastěji využívá spalovacích elektráren, které pracují na principu spalování fosilních paliv. Nejčastěji se používá uhlí, dále ropa nebo zemní plyn.



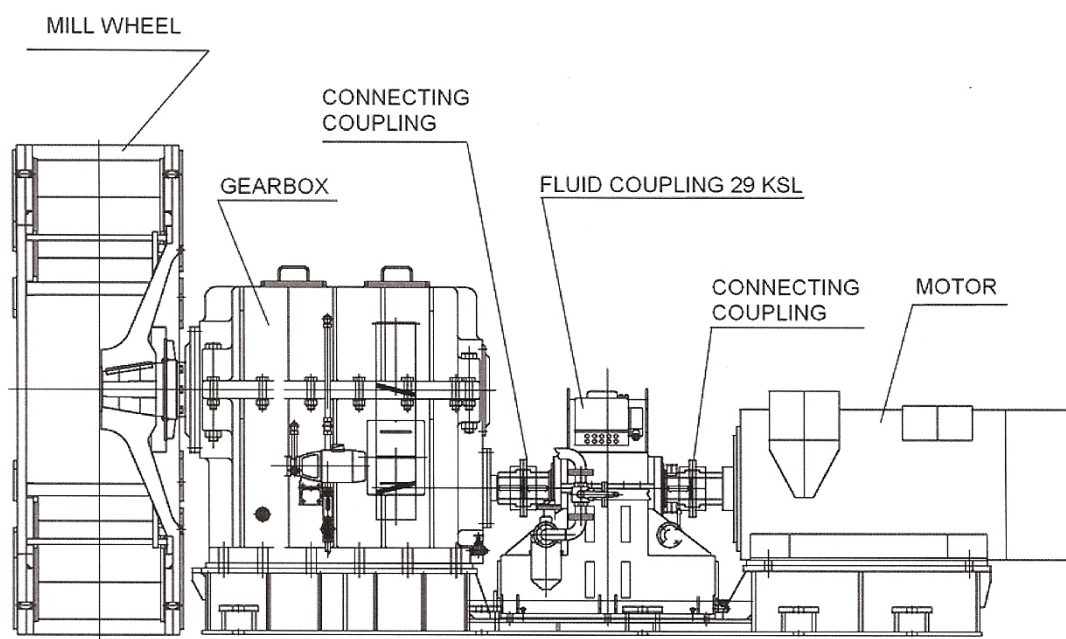
Obrázek 1.1 Schéma uhelné elektrárny

Princip spalovací elektrárny, konkrétně uhelné, spočívá v přeměně chemické energie vázané v uhlí na energii elektrickou. Samotné uhlí je třeba před procesem spalování upravit. První je nezbytné zbavit uhlí nečistot, jako jsou horniny, dále se uhlí musí nadrtit na určitou velikost. Tento proces probíhá v místě elektrárny, která se nazývá „uhelný mlýn“ (mlecí zařízení). Směs, která vznikne po nadrcení, se nazývá „uhelný prach“. Poté se uhelný prach dopravuje do kotle, kde dochází k samotnému spalování, při kterém vzniká

teplo. Vzniknuvší teplo ohřívá demineralizovanou vodu, která se postupně mění na páru o teplotě přibližně 525°C a přetlaku větším než 6 MPa. Přehřátá pára je odváděna do turbíny, kde roztáčí lopatky turbíny, která je spojena s alternátorem, v němž se následně přeměňuje energie kinetická na energii elektrickou na základě jevu elektromagnetické indukce. Elektřina je poté odváděna do transformátorů, ve kterých se upravuje napětí, a poté je vyvedena do rozvodné sítě.

2. Popis soustavy pohonu mlecího kola

Soustava, která bude podrobena analýze, se nachází v „uhelném mlýně“, kde se uhlí „mele“ na požadované parametry. Soustava se skládá z trojfázového asynchronního elektromotoru, který rozbíhá celou soustavu, dále z pružné hřídelové spojky spojující motor s hydrodynamickou spojkou a z další pružné hřídelové spojky, která spojuje hydrodynamickou spojku s převodovkou, která je napojena na samotné mlecí kolo. Tato soustava tedy slouží k namletí uhlí na uhelný prach požadované velikosti, který je po namletí připraven ke spalování.

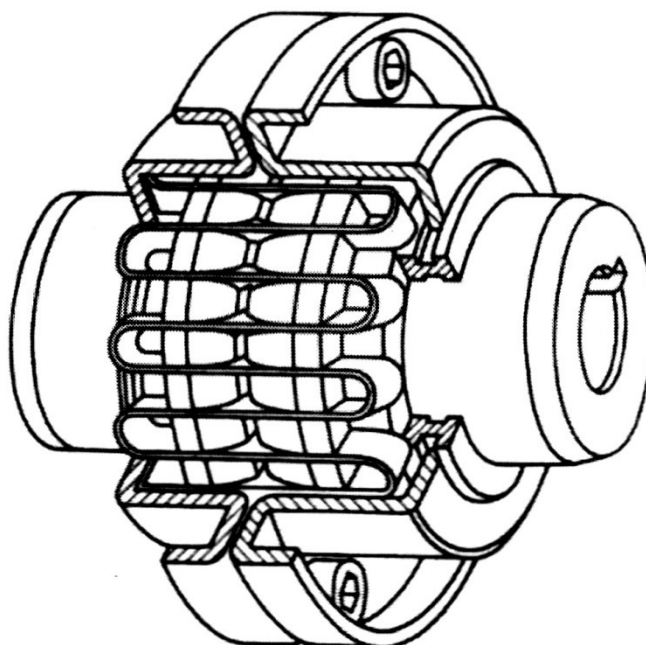


Obrázek 2.1 Schéma soustavy pohonu mlecího kola [3]

Spojka je strojní součást, která ve většině případů spojuje hnací a hnanou hřídel. Tato součást slouží především k přenosu krouticího momentu, k vyrovnání nesouososti dvou hřídelů či vyrovnání teplotních dilatací. Možností využití spojky je velmi mnoho. Podle jejich charakteristických vlastností můžeme spojky dělit např.:

- na pevné, které přenášejí stálý krouticí moment z hnacího hřídele na hnaný,
- pohyblivé, které umožňují rozpojení obou hřídelů za chodu neboli zastavení přenosu krouticího momentu, což se využívá nejčastěji v automobilech,

- pojistné střížné, které zajistí přerušení přenosu krouticího momentu, pokud krouticí moment překročí dovolenou hodnotu,
- rozběhové, pomocí nichž je zajištěn plynulý rozběh hnaného hřídele,
- pružné, které dokáží tlumit rázy a vibrace.



Obrázek 2.2 Pružná spojka s hadovitou pružinou

2.1 Pružná hřídelová spojka

Pružné spojky mohou sloužit k vyrovnání nesouosostí hřídelů, ale hlavně díky své poddajnosti tlumí rázy a vibrace. Energie rázu se v nich přeměňuje na deformační práci a tepelnou energii. Tyto spojky jsou vyráběny jak z kovu, tak i z pryže nebo plastu podle potřeby.



Obrázek 2.3 Pružná spojka typu ARCUSAFLEX AC8

2.2 Hydrodynamická spojka

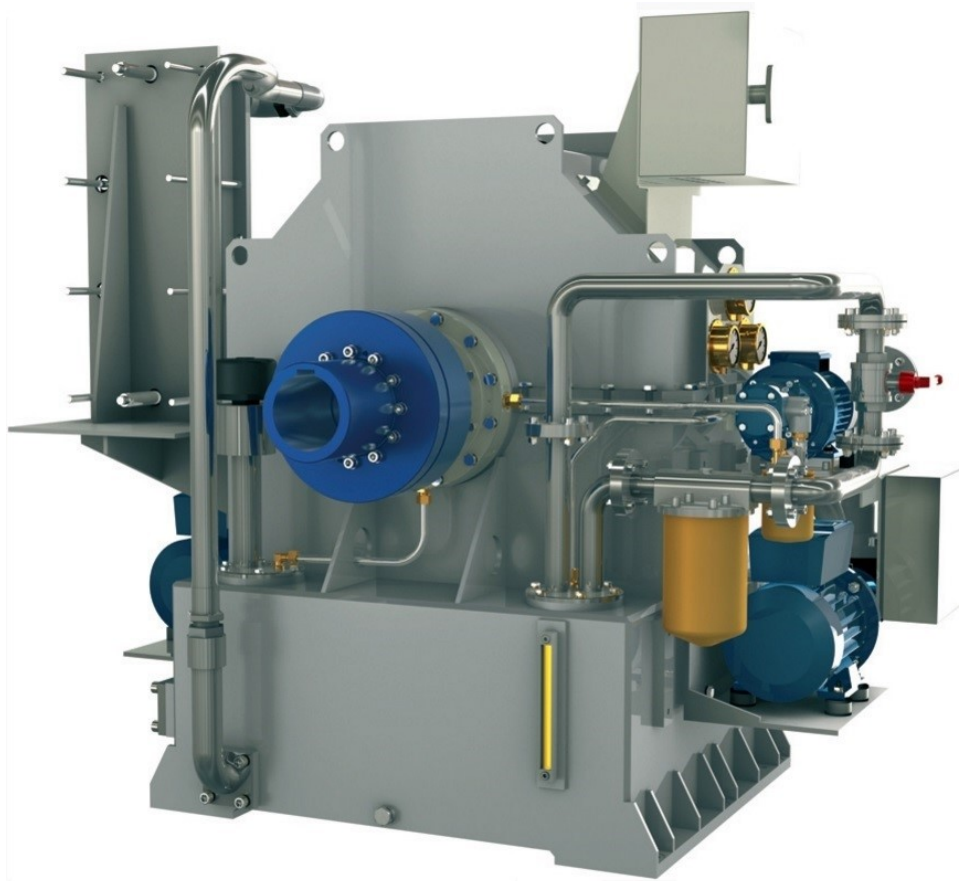
Hydrodynamická spojka se řadí do skupiny hydraulických spojek. Ty se dále dělí na hydrostatické a již zmíněné hydrodynamické spojky.

Hydrodynamická spojka je typ spojky, která slouží k rozběhu a regulaci otáček strojů poháněných elektromotorem se středním a vysokým výkonem. Princip fungování hydrodynamické spojky spočívá v přenášení krouticího momentu pomocí kapaliny v pracovním prostoru. Uvnitř hydrodynamické spojky jsou dvě rotující lopatková kola, z nichž jedno je spojeno s hnacím hřídelem a druhé s hnaným hřídelem. Pracovní prostor (oběžná turbína) je tedy vyplněn přenosovou kapalinou, která je zde načerpána pomocí čerpadla, které je poháněno samostatným elektromotorem s frekvenčním měničem. Hnací hřídel se točí prostřednictvím pohonu a tím roztáčí i přenosovou kapalinu. Díky viskozitě přenosové kapaliny je do rotačního pohybu uveden i hnaný hřídel, čímž se přenáší krouticí

moment z hnacího hřídele přes kapalinu na hnaný hřídel. V některých aplikacích je pracovní kapalina čerpána do oběžné turbíny průběžně během zatížení, což zajišťuje plynulost rozběhu soustavy. Při postupném naplňování pracovního prostoru kapalinou se snižuje skluz (rozdíl otáček na vstupu a výstupu vztažený k otáčkám na vstupu) a zvyšují se otáčky na výstupní hřídeli, tedy čím více je kapaliny v pracovním prostoru, tím větší jsou otáčky na výstupní hřídeli.

Pracovní kapalinou bývají kapaliny s vysokou viskozitou např. olej. Viskozita ovšem klesá s rostoucí teplotou, což může být nežádoucí v některých případech, proto musí být kapalina chlazena.

Kapalina dále vytéká z pracovního prostoru kalibrovanými tryskami po obvodě oběžné turbíny zpět do nádrže s kapalinou.



Obrázek 2.4 Hydrodynamická spojka KSL

Schopnost hydrodynamické spojky přenášet moment závisí na přítomnosti určitého množství kapaliny v oběžné turbíně (naplnění v rozmezí 0-100%) a na skluzu, tedy rozdílu otáček na vstupu a výstupu hydrodynamické spojky. Základní vztah, který vyjadřuje tuto závislost, je:

$$M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2 \quad (2.1)$$

kde M_{HS} -je krouticí moment přenášený hydrodynamickou spojkou [$N \cdot m$],

λ -je parameter [-],

n -otáčky [ot/min].

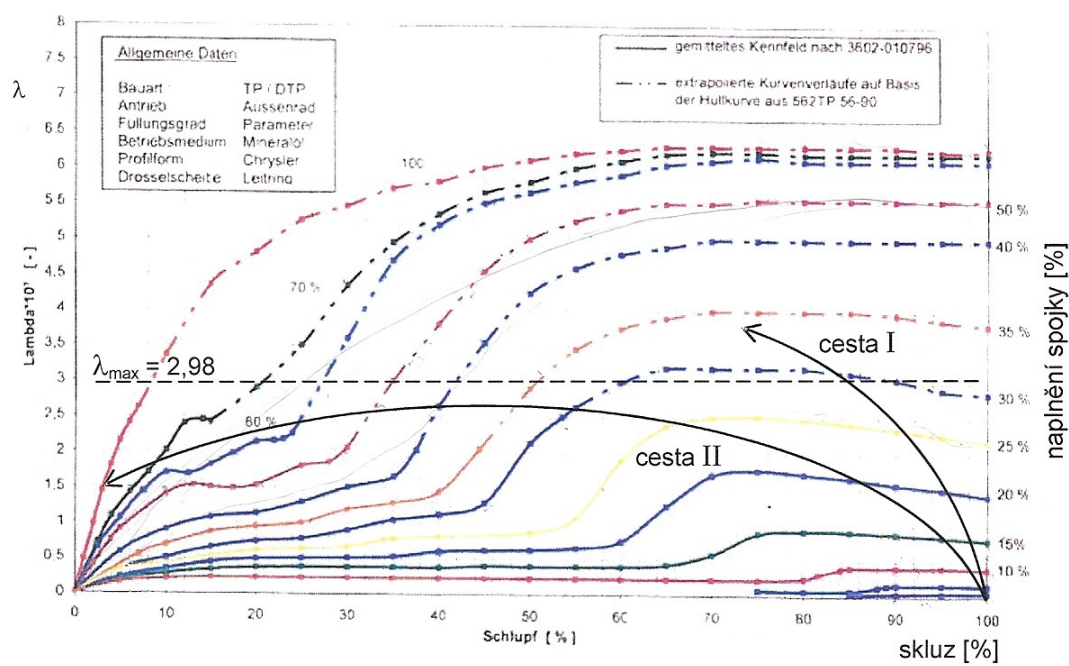
Parametr λ je proměnná, jejíž hodnota je závislá na skluzu a naplnění oběžné turbíny. Jak už bylo zmíněno, skluz je definován jako relativní rozdíl otáček na vstupu a výstupu vztahený k otáčkám na vstupu neboli vyjádřeno pomocí vzorce:

$$skluz = \frac{n-n_v}{n}, \quad (2.2)$$

kde n -otáčky na vstupu

n_v -otáčky na výstupu.

Hodnota průběhu parametru λ je zobrazena v grafu na obrázku 2.5, kde vodorovná osa představuje skluz a jednotlivé křivky úrovně naplnění. Součástí grafu je úsečka $\lambda = 2,98$ představující mezní hodnotu lambda, jejíž význam bude vysvětlen v jedné z následujících kapitol.



Obrázek 2.5 Graf hodnot parametru lambda [3]

3. Analýza rozběhu na prázdkno

Při rozběhu na prázdkno je hydrodynamická spojka rozpojena a bez náplně, tudíž nepřenáší žádný krouticí moment a motor tedy roztáčí jen pružnou spojku a vstupní oběžné kolo hydrodynamické spojky. Jelikož je rozběh realizován z klidu, počáteční podmínky jsou nulové.

$$\omega_0 = 0 \frac{rad}{s} \quad (3.1)$$

$$\varphi_0 = 0 rad \quad (3.2)$$

3.1 Přibližný výpočet

Přibližný výpočet slouží pro orientační kontrolu následného přesného výpočtu. V přibližném výpočtu je uvaženo, že je celá soustava absolutně tuhá a hnací moment konstantní. Další předpoklad je, že se soustava bude rozbíhat rovnoměrně zrychleným pohybem podle pohybové rovnice:

$$I_C \cdot \varepsilon = M_P \quad (3.3)$$

I_C -Celkový moment setrvačnosti

ε -Úhlové zrychlení

M_P Průměrný hnací moment

V prvním kroku přibližného výpočtu je vypočtena hodnota ε . K tomu je třeba znát tedy velikost celkového momentu setrvačnosti a průměrného hnacího momentu. Celkový moment setrvačnosti je vypočten jako součet jednotlivých momentů setrvačnosti dílčích částí soustavy, tj. moment setrvačnosti motoru, moment setrvačnosti pružné hřídelové spojky a moment setrvačnosti vstupního oběžného kola hydrodynamické spojky. Průměrný hnací moment je realizován jako průměr ze záběrového momentu a jmenovitého hnacího momentu. Jmenovitý hnací moment je moment při jmenovitých otáčkách a záběrový

moment je moment při nulových otáčkách. Z dalších vypočtených proměnných je následně vypočten i samotný čas rozběhu t_r .

Celkový moment setrvačnosti:

Motor	$I_M = 15,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Pružná hřídelová spojka	$I_{PS} = 3,52 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Vstupní oběžné kolo hydrodynamické spojky	$I_{HS1} = 5,7835 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$I_C = I_M + I_{PS} + I_{HS1} = 15,28 + 3,52 + 5,7835 \quad (3.4)$$

$$= 24,5835 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Průměrný hnací moment:

Jmenovitý hnací moment	$M_N = 5134 \text{ N} \cdot \text{m}$
Koeficient pro záběrový moment	1,2
Záběrový moment	

$$M_Z = 1,2 \cdot M_N = 1,2 \cdot 5134 \cong 6161 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_P = \frac{M_N + M_Z}{2} = \frac{5134 + 6161}{2} = 5647 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.5)$$

Úhlové zrychlení:

Pohybová rovnice	$I_C \cdot \varepsilon = M_P$
------------------	-------------------------------

$$\varepsilon = \frac{M_P}{I_C} = \frac{5647}{24,5835} \cong 230 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.6)$$

Jmenovité úhlová rychlost:

Jmenovité otáčky

$$n_N = 1488 \frac{ot}{min}$$

$$\omega_N = \frac{\pi \cdot n_N}{30} = \frac{\pi \cdot 1488}{30} = 155,8 \frac{rad}{s} \quad (3.7)$$

Doba rozběhu (po dosažení jmenovitých otáček):

Časový průběh úhlové rychlosti

$$\omega = \varepsilon \cdot t$$

$$t_r = \frac{\omega_N}{\varepsilon} = \frac{155,8}{230} = 0,678 \text{ s} \quad (3.8)$$

Úhlová dráha rozběhu:

Časový průběh úhlové dráhy

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot t^2$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot t^2 = \varphi = \frac{1}{2} \cdot 230 \cdot 0,678^2 = 52,86 \text{ rad} \quad (3.9)$$

Počet otočení při rozběhu:

Úhlová dráha jednoho otočení

$$\varphi_1 = 2\pi$$

$$N_r = \frac{\varphi}{\varphi_1} = \frac{52,8}{2\pi} = 8,4 \text{ otočení} \quad (3.10)$$

3.2 Nerovnoměrný rozběh jednohmotové soustavy

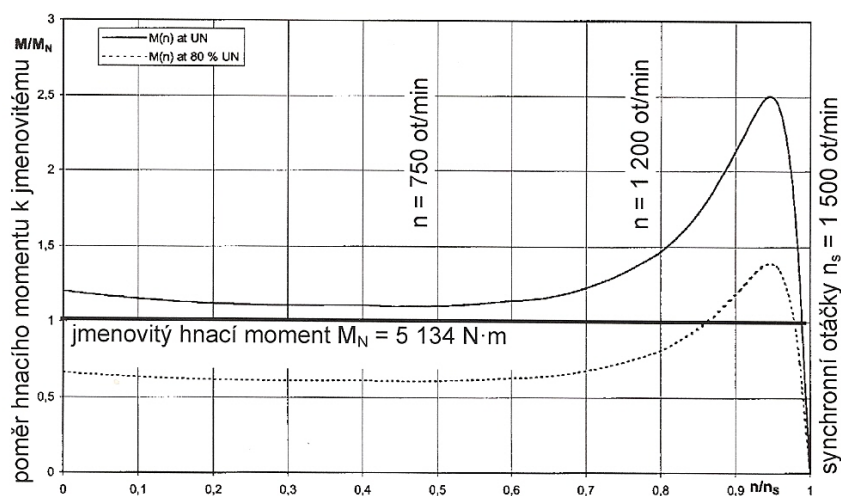
Při nerovnoměrném rozběhu jednohmotové soustavy uvažujeme vliv charakteristiky motoru. Rovněž je zde předpoklad, že soustava je absolutně tuhá. Závislost hnacího momentu motoru na otáčkách je zachycena v grafu na obrázku 3.1. Na vodorovné ose grafu je zobrazen poměr otáček k synchronním otáčkám $n_s = 1500 \text{ ot/min}$, které představují otáčky při běhu bez zatížení a tedy s nulovým přenášeným momentem. Na svislé ose je poměr hnacího momentu, odpovídajícího daným otáčkám, ke jmenovitému momentu $M_N = 5134 \text{ N} \cdot \text{m}$. Důležitými body charakteristiky jsou záběrový moment $M_Z = 6161 \text{ N} \cdot \text{m}$, který odpovídá nulovým otáčkám, jmenovitý moment a moment zvratu $M_{ZV} = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$ odpovídající otáčkám $n = 1419 \text{ ot/min}$, který představuje maximum charakteristiky a vypočte se následovně.

Jmenovitý hnací moment $M_N = 5134 \text{ N} \cdot \text{m}$

Koeficient pro moment zvratu 2,5

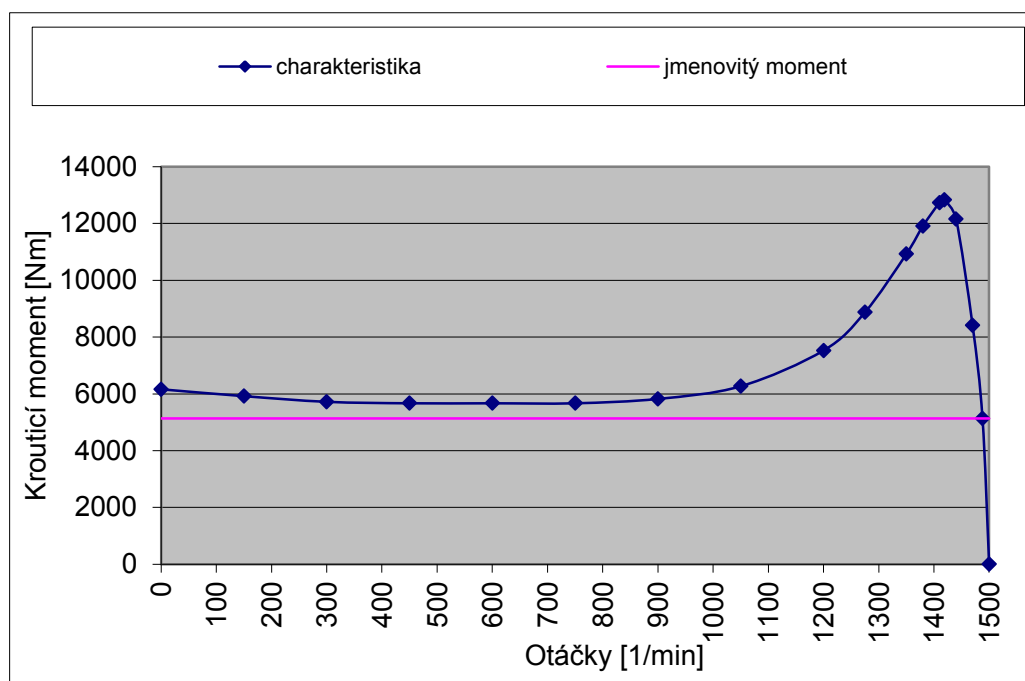
$$M_{ZV} = 2,5 \cdot M_N = 2,5 \cdot 5134 = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.11)$$

První část charakteristiky, od nulových otáček po bod zvratu, je oblast rozběhu. Druhá část charakteristiky, od bodu zvratu po koncový bod, který odpovídá synchronním otáčkám a nulovému hnacímu momentu, je provozní oblast. V této oblasti by se motor měl pohybovat za provozu.



Obrázek 3.1 Charakteristika motoru, závislost na relativních otáčkách [3]

Charakteristika v grafické podobě byla digitalizována a převedena na přímou závislost hnacího momentu $M_H [N \cdot m]$ na otáčkách $n [ot/min]$ neboli úhlové rychlosti $\omega [rad/s]$ zobrazeno na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Závislost hnacího momentu na otáčkách [3]

Jelikož soustava nezvyšuje své otáčky rovnoměrně, tedy úhlové zrychlení ε není konstantní, jak bylo uvaženo v přibližném výpočtu, proto je nutno vytvořit přesný výpočet numericky. V samotném výpočtu bude mít pohybová rovnice podobu diferenciální rovnice s počátečními podmínkami, tudíž níže je uvedeno několik numerických metod pro řešení tohoto typu rovnic.

Jednokrokové numerické metody:

1. Eulerova metoda:

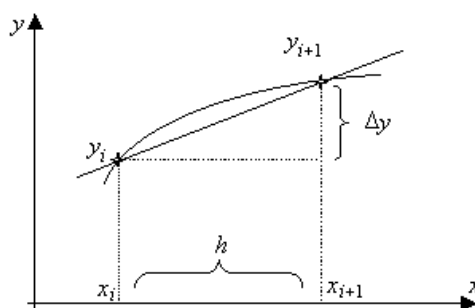
Mezi charakteristické rysy této metody patří informace, která nám říká, že přibližné řešení y_{i+1} v bodě x_{i+1} vychází ze znalosti přibližného řešení y_i v bodě x_i . Tuto metodu tedy můžeme považovat za speciální případ obecné jednokrokové metody, pokud rozumíme pod obecnou jednokrokovou metodou jakýkoliv algoritmus pro řešení diferenciální rovnice, ve které se přibližné řešení y_{i+1} v bodě x_{i+1} vypočítá pouze na základě znalostí veličin x_i, y_i .

Princip Eulerovy metody je založen na diskretizaci. Postupně je vytvářena posloupnost uzlů $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$, pro které se postupně vypočítají hodnoty $y(x_0), y(x_1), y(x_2), \dots, y(x_n)$. Vzorci pro tyto výpočty mají rekurentní charakter.

Důležitým parametrem Eulerovy metody je krok h , který rozdělí funkci na n počet uzlů, ve kterých je vypočtena hodnota funkce z hodnoty funkce předchozího uzlu. Krok h tedy představuje vzdálenosti mezi uzly x_i a x_{i+1} . Grafickým spojením vypočtených hodnot funkce je vytvořen její průběh, jehož přesnost je závislá na velikosti kroku h . Při velkém kroku h jsou vypočtené hodnoty funkce dvou sousedících uzlů příliš rozdílné a průběh funkce je skokový, zatímco při dostatečně malém kroku h se vypočtené hodnoty liší jen nepatrně a ve výsledku tvoří plynulý průběh funkce. Výpočet hodnoty funkce v libovolném uzlu lze vyjádřit rovnicí:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, n - 1 \quad (3.12)$$

Na obrázku 3.3 jsou znázorněny průběhy funkcí mezi dvěma uzly. Křivka představuje reálný průběh, zatímco přímka zastupuje průběh získaný Eulerovou metodou.



Obrázek 3.3 Průběh funkcí

2. Heunova metoda:

Tato metoda je další z jednokrokových metod. U této metody rovněž jak u Eulerovy metody je potřeba k vypočtení hodnoty y_{i+1} použít hodnotu přibližného řešení z předcházejícího kroku y_i . Od Eulerovy metody se ovšem liší svým řádem. Zatímco Eulerova metoda je metodou prvního řádu, Heunova metoda je metodou řádu druhého. Vyšší řád dané metody říká, že k vypočtení hodnoty v jednom kroku je zapotřebí většího objemu výpočtů. Jelikož Heunova metoda je metodou druhého řádu, hodnota pravé strany funkce se počítá ve dvou bodech pomocí rekurentních vzorců:

$$\begin{aligned}k_1 &= h \cdot f(x_i, y_i) \\k_2 &= h \cdot f(x_i + h, y_i + k_1), \\y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{2} \cdot (k_1 + k_2), i = 0, \dots, n - 1\end{aligned}\tag{3.13}$$

3. Metoda Runge-Kutta:

Metoda podle Runge-Kutta je rovněž jednokroková metoda. Principem se neliší od Heunovy metody, ovšem disponuje vyšším řádem. Zmiňovaná metoda je metodou čtvrtého řádu, tudíž hodnota pravé strany funkce se počítá ve čtyřech bodech, k čemuž je nutný větší počet výpočtů než u Heunovy metody. Rekurentní vzorce této metody mají podobu:

$$\begin{aligned}k_1 &= h \cdot f(x_i, y_i) \\k_2 &= h \cdot f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right), \\k_3 &= h \cdot f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right), \\k_4 &= h \cdot f(x_i + h, y_i + k_3), \\y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4), i = 0, \dots, n - 1\end{aligned}\tag{3.14}$$

3.2.1 Aproximace charakteristiky motoru

Při aproximaci charakteristiky se nabízelo několik možností způsobu aproximace. Jako první byla aproximace provedena pomocí Klossova vztahu.

Aproximace Klossovým vztahem

Obecně proměnná úhlová rychlost	ω
---------------------------------	----------

Synchronní úhlová rychlost	ω_s
----------------------------	------------

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} = 157,08 \frac{rad}{s} \quad (3.15)$$

Úhlová rychlost zvratu	ω_{zv}
------------------------	---------------

$$\omega_{zv} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1419}{60} = 148,6 \frac{rad}{s} \quad (3.16)$$

Moment zvratu	$M_{zv} = 12835 N \cdot m$
---------------	----------------------------

Skluz	$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$
-------	--

Skluz v bodě zvratu	s_{zv}
---------------------	----------

$$s_{zv} = \frac{\omega_s - \omega_{zv}}{\omega_s} = \frac{157,08 - 148,6}{157,08} = 0,054 \quad (3.17)$$

Klossův vztah

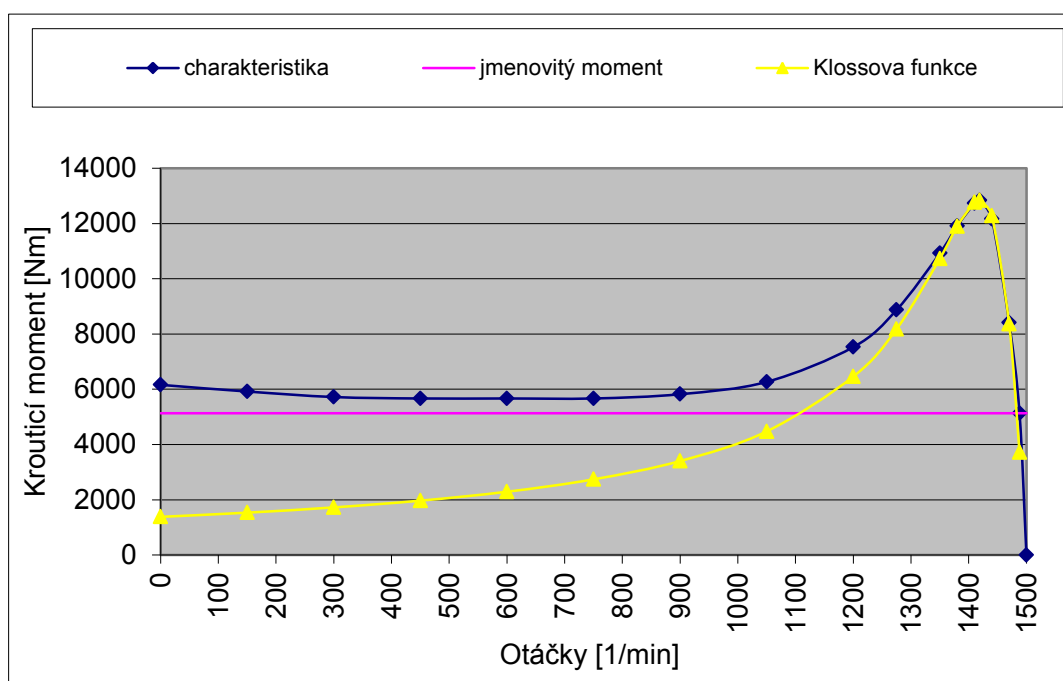
$$M = \frac{2 \cdot M_{zv}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (3.18)$$

Např. pro $\omega = 100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{157,08 - 100}{157,08} = 0,36$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{zV}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} = \frac{2 \cdot 12835}{\frac{0,36}{0,054} + \frac{0,054}{0,36}} \cong 3766 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Po zadání Klossova vztahu do programu Excel a vyhodnocení průběhu úhlové rychlosti ω , byl vytvořen graf aproximované charakteristiky, který je zobrazen na obrázku 3.3. Jak je patrné, aproximovaná charakteristika v první části zcela neodpovídá původní charakteristice.



Obrázek 3.3 Aproximace Klossovým vztahem [3]

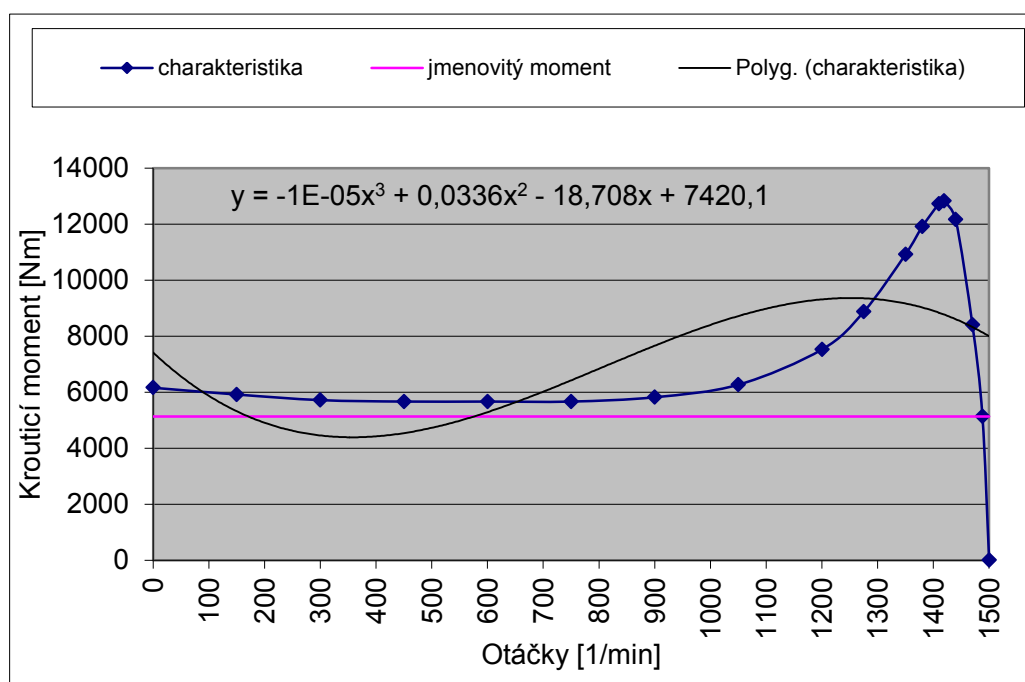
Jelikož aproximace pomocí Klossova vztahu je nepřijatelná, byla dále použita aproximace kubickým polynommem.

Aproximace kubickým polynomem

Aproximace polynomem byla zvolena proto, jelikož se obecně s polynomy dobře pracuje. Řád polynomu byl stanoven vylučovací metodou od prvního stupně až ke třetímu, který vyhovoval.

$$f = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (3.19)$$

Pro aproximaci polynomem třetího řádu bylo nutné nejdříve zjistit jednotlivé koeficienty polynomu. V programu Excel v charakteristice motoru byla pomocí funkce „Přidat spojnicí trendu“ vytvořena křivka aproximovaná kubickým polynomem. Křivka téměř vůbec nekopírovala původní charakteristiku, což bylo způsobené přílišným stoupáním a klesáním v krátkém rozsahu.



Obrázek 3.4 Aproximace kubickým polynomem na celém úseku [3]

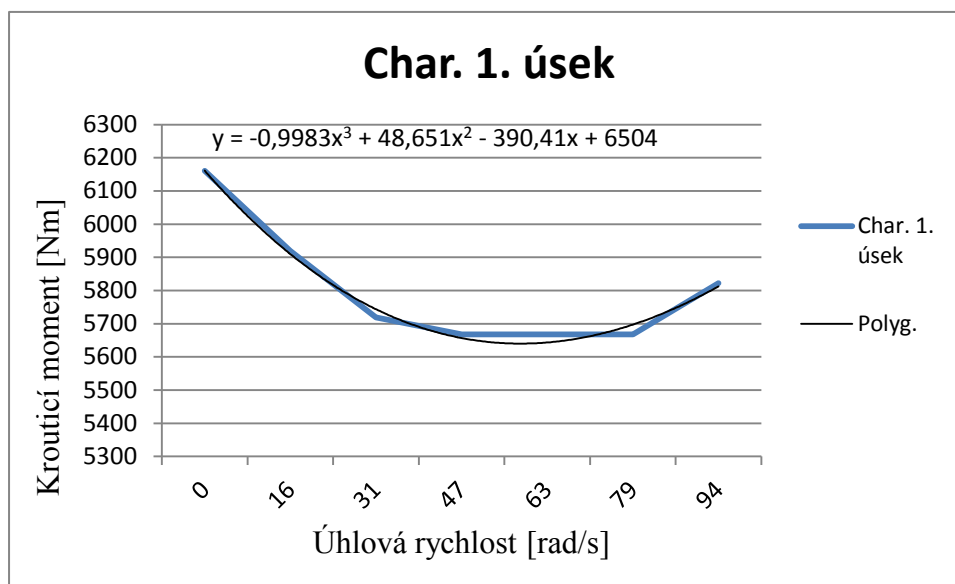
Následně bylo provedeno rozdělení charakteristiky do tří částí, jež budou aproximovány každá samostatně, aby se předešlo zkreslení způsobeným přílišným stoupáním a klesáním. Dané tři úseky byly stanoveny takto:

$$0 < \omega < 100 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$100 < \omega < 148 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$148 \frac{\text{rad}}{\text{s}} < \omega$$

Aproximované funkce vytvořené v Excelu pro jednotlivé úseky už značně kopírovaly původní funkci, tudíž bylo možné si nechat zobrazit rovnice aproximovaných funkcí již s Excelem vypočtenými koeficienty.



Obrázek 3.5 Aproximace prvního úseku

V následné kontrole byly momenty, který se počítal pomocí polynomu s koeficienty vypočtenými Excelem, přiřazovány nereálné hodnoty a ty se opět neztotožňovaly s původní charakteristikou, tudíž bylo nutno přejít ke zjištění jednotlivých koeficientů ručně pomocí metody nejmenších čtverců.

Pro zjištění koeficientů bylo nutné vyřešit rovnici:

$$S(a, b, c, d) = \sum_{i=0}^n [(a \cdot x_i^3 + b \cdot x_i^2 + c \cdot x_i + d) - f_i]^2 \quad (3.20)$$

V našem případě:

$$S(a, b, c, d) = \sum_{i=0}^n [(a \cdot \omega_i^3 + b \cdot \omega_i^2 + c \cdot \omega_i + d) - M_i]^2 \quad (3.21)$$

Následně byly vypočteny parciální derivace, které byly položeny nule, a dále vytvořili soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \rightarrow \sum_{i=0}^n 2 \cdot \omega_i^3 \cdot [(a \cdot \omega_i^3 + b \cdot \omega_i^2 + c \cdot \omega_i + d) - M_i] = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \rightarrow \sum_{i=0}^n 2 \cdot \omega_i^2 \cdot [(a \cdot \omega_i^3 + b \cdot \omega_i^2 + c \cdot \omega_i + d) - M_i] = 0 \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \rightarrow \sum_{i=0}^n 2 \cdot \omega_i \cdot [(a \cdot \omega_i^3 + b \cdot \omega_i^2 + c \cdot \omega_i + d) - M_i] = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \rightarrow \sum_{i=0}^n 2 \cdot [(a \cdot \omega_i^3 + b \cdot \omega_i^2 + c \cdot \omega_i + d) - M_i] = 0 \quad (3.25)$$

Po úpravě rovnice získaly tuto podobu:

$$a \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^6 + b \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^5 + c \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^4 + d \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^3 = \sum_{i=0}^n M_i \cdot \omega_i^3$$

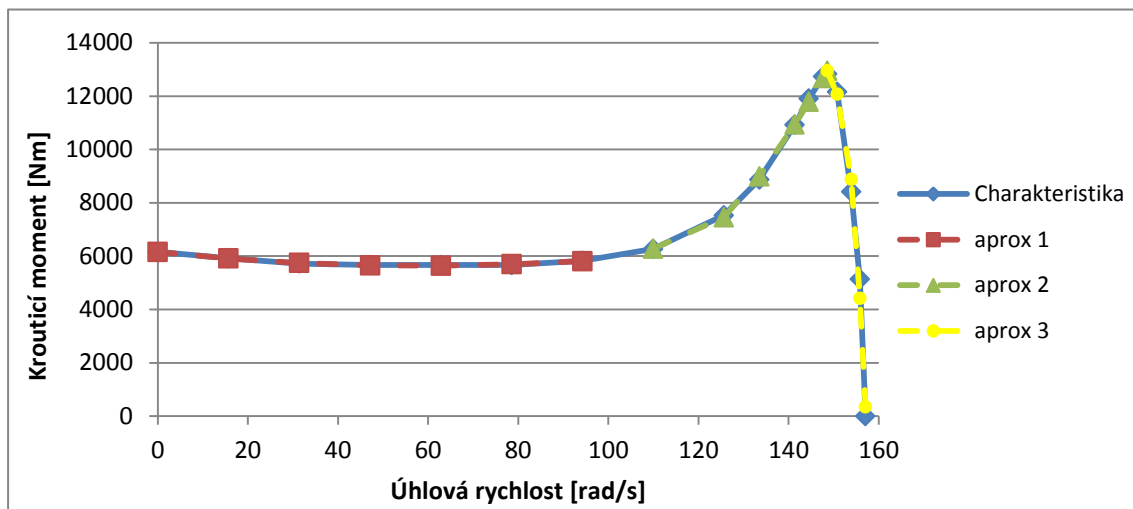
$$a \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^5 + b \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^4 + c \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^3 + d \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^2 = \sum_{i=0}^n M_i \cdot \omega_i^2$$

$$a \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^4 + b \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^3 + c \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^2 + d \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i = \sum_{i=0}^n M_i \cdot \omega_i$$

$$a \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^3 + b \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i^2 + c \cdot \sum_{i=0}^n \omega_i + d \cdot \sum_{i=0}^n 1 = \sum_{i=0}^n M_i$$

Soustava byla vyřešena pro každý úsek samostatně. Výsledné podoby kubického polynomu pro každý úsek jsou zapsány v následující kapitole.

Po vypočtení koeficientů metodou nejmenších čtverců, byla vytvořena správná aproximační funkce, která se ztotožňovala s původní charakteristikou, viz obrázek 3.5.



Obrázek 3.6 Aproximace kubickým polynomem ve třech úsecích.

3.2.2 Numerický výpočet doby rozběhu

Pohybová rovnice soustavy při rozběhu na prázdno je:

$$I_C \cdot \varepsilon = M_H(\omega) \quad (3.26)$$

kde $I_C = 24,5835 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ -je celkový moment setrvačnosti,
 ε -je úhlové zrychlení,
 $M_H(\omega)$ -je hnací moment, závislý na úhlové rychlosti.

Po úpravě pohybová rovnice získala následující podobu:

$$\varepsilon - \frac{a(\omega)}{I_C} - \frac{b(\omega)}{I_C} \cdot \omega - \frac{c(\omega)}{I_C} \cdot \omega^2 - \frac{d(\omega)}{I_C} \cdot \omega^3 = 0 \quad (3.27)$$

kde ω -je první derivace úhlové dráhy,
 ε -je druhá derivace úhlové dráhy,
 a, b, c, d -jsou koeficienty polynomu,
 I_C -je celkový moment setrvačnosti.

Nynější pohybová rovnice v podobě nelineární diferenciální rovnice II. řádu s proměnnými koeficienty byla řešena pomocí Eulerovy numerické metody. Tato metoda byla zvolena díky její jednoduchosti. Přesnost byla vykompenzována dostatečně malým krokem, aby se zabránilo skokovému průběhu funkce. Výpočet má formu tabulky, která se skládá z 6 sloupců, ve kterých byl zapsaný postupně čas, úhel natočení, úhlová rychlost, úhlové zrychlení, otáčky za minutu a hnací moment. Jelikož rozběh je realizován z klidu, v prvním řádku jsou zapsané počáteční podmínky a to takové, že čas, úhel natočení, úhlová rychlost a otáčky jsou nulové. V závislosti na úhlové rychlosti je spočítán i hnací moment

pomocí jednoho ze tří vzorců, které jsou příslušné třem úsekům, do kterých byla charakteristika rozdělena. Z hnacího momentu je následně vypočteno úhlové zrychlení.

Hnací moment:

1. Úsek: (3.28)

$$M_H(\omega) = 6161,288952 - 18,85040139 \cdot \omega + 0,185036509 \cdot \omega^2 - 0,000257568 \cdot \omega^3$$

2. Úsek: (3.29)

$$M_H(\omega) = 172184,4738 - 3671,737701 \cdot \omega + 25,85262549 \cdot \omega^2 - 0,056224587 \cdot \omega^3$$

3. Úsek:

$$M_H(\omega) = 0,002346 - 37727,9 \cdot \omega + 503,3149 \cdot \omega^2 - 1,67506 \cdot \omega^3 \quad (3.30)$$

Úhlové zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{M_H(\omega)}{I_c} \quad (3.31)$$

V druhém řádku tabulky už je realizován výpočet, kde hrají roli počáteční podmínky z prvního řádku. Vzorce, které jsou užity v druhém řádku, jsou platné pro všechny následující řádky, tudíž v programu Excel stačí druhý řádek „roztáhnout“ dolů na požadovaný počet kroků. Ve vzorcích se vyskytuje veličina Δt , která představuje čas délky kroku numerické integrace. Její hodnota byla určena několika pokusy tak, aby průběh ostatních veličin byl plynulý a ne skokový. Hodnota kroku byla stanovena na:

$$\Delta t = 0,001 \text{ s} \quad (3.32)$$

Úhel natočení:

$$\varphi_{i+1} = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_i \cdot \Delta t + \omega \cdot \Delta t + \varphi_i \quad (3.33)$$

Úhlová rychlost:

$$\omega_{i+1} = \varepsilon_i \cdot \Delta t + \omega_i \quad (3.34)$$

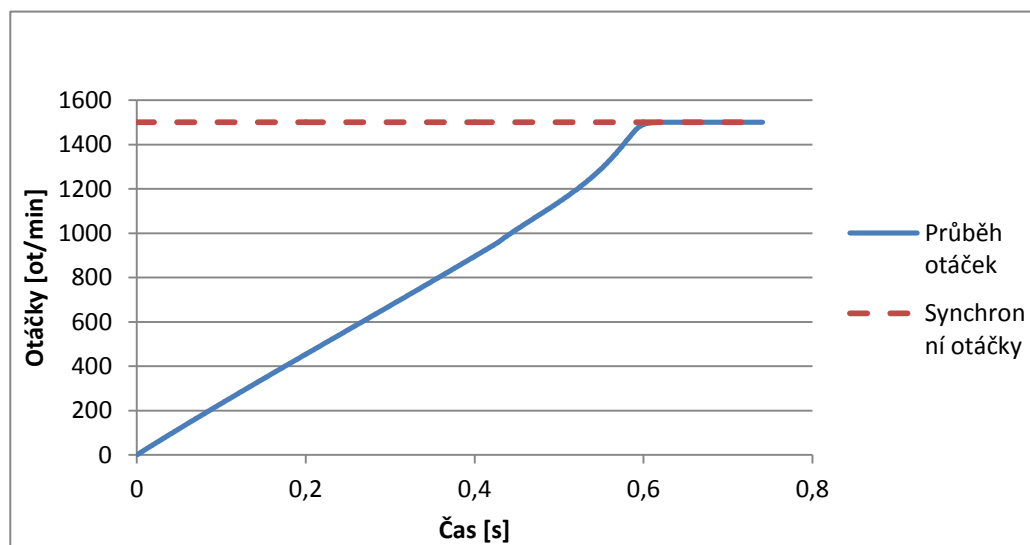
Otáčky za minutu:

$$n_i = \frac{\omega_i \cdot 30}{\pi} \quad (3.35)$$

Po vytvoření dostatečného množství řádků, kdy se hodnota otáček ustálí na synchronních otáčkách, byl vytvořen graf závislosti otáček na čase, kde svislá osa představuje otáčky a vodorovná osa zastupuje čas. Z řešení vyplývá, že čas rozběhu je přibližně 0,62 sekundy. Během prvních 0,5 sekund otáčky stoupají přibližně rovnoměrně. V úseku do přibližně 1000 *ot/min* se hnací moment mění poměrně málo a lze ho považovat za konstantní a tedy se jedná přibližně o rovnoměrně zrychlený pohyb. Od 1000 *ot/min* hnací moment značně stoupá, čímž se zvětšuje zrychlení a s ním se zvyšují i otáčky. Po přechodu přes 1419 *ot/min*, které představují otáčky momentu zvratu, hnací moment výrazně klesá a otáčky konvergují k synchronním otáčkám $n_s = 1500 \text{ ot/min}$. K ustálení chodu na synchronních otáčkách dojde ve zmiňovaném čase

$$t_r = 0,62 \text{ s.} \quad (3.36)$$

Hodnota poměrně souhlasí s časem $t_r = 0,678\text{ s}$, který byl vypočten přibližným výpočtem v kapitole 3.1.



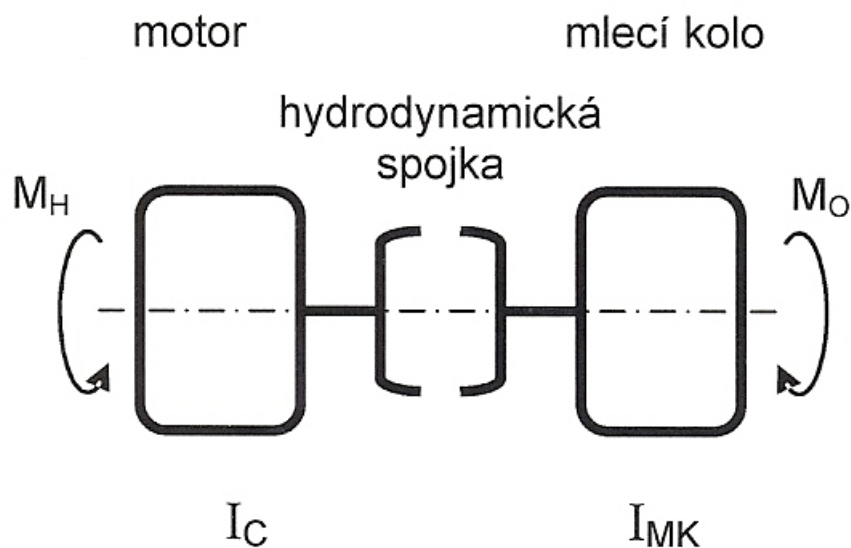
Obrázek 3.6 Závislost otáček na čase

4. Analýza rozběhu mlecího kola

Po rozběhnutí motoru se určitou rychlostí začne naplňovat hydrodynamická spojka, která díky svým vlastnostem, jež byly zmíněné v kapitole 2.2, začne přenášet krouticí moment na převodovku a následně na mlecí kolo, čímž se tato část začne roztáčet.

4.1 Dvouhmotový výpočtový model

Pro výpočtovou analýzu rozběhu mlecího kola byl vytvořen dvouhmotový výpočtový model, kde M_H je hnací moment motoru, M_O je moment odporu působící proti směru pohybu, I_C je celkový moment setrvačnosti na straně pohonu a I_{MK} je moment setrvačnosti na straně mlecího kola. Jelikož moment odporu nebyl blíže specifikovaný, budou realizovány dva výpočty. Jeden bez momentu odporu a druhý s odhadnutou hodnotou momentu odporu.



Obrázek 4.1 Schéma dvouhmotového modelu [3]

4.1.1 Soustava „pohon“

Momenty setrvačnosti na straně pohonu byly sečteny už v kapitole 3.1, ovšem v tomto výpočtu je potřeba přičíst navíc i polovinu olejové náplně hydrodynamické spojky.

Motor	$I_M = 15,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Pružná hřídelová spojka	$I_{PS} = 3,52 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Vstupní oběžné kolo hydrodynamické spojky	$I_{HS1} = 5,7835 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Polovina olejové náplně	$I_{O1/2} = 1,5061 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$I_C = I_M + I_{PS} + I_{HS1} + I_{O1/2} \quad (4.1)$$

$$I_C = 15,28 + 3,52 + 5,7835 + 1,5061$$

$$I_C = 26,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.1.2 Soustava „mlecí kolo“

Než bude možno sečíst momenty setrvačnosti, je potřeba, aby všechny momenty setrvačnosti byly redukovány na výstupní hřídel hydrodynamické spojky. Všechny zadané hodnoty byly redukovány na výstupní hřídel spojky mimo mlecího kola, proto je nutné tuto redukci provést. Dále je nutné opět přičíst moment setrvačnosti poloviny olejové náplně.

Mlecí kolo	$I_{MK} = 11\,670 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Převod	$i=2,179$

$$I_{MKSP} = \frac{I_{MK}}{i} = \frac{11670}{2,179^2} = 2458 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.2)$$

Výstupní strana hydrodynamické spojky $I_{HS2} = 12,0203 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Polovina olejové náplně $I_{O1/2} = 1,5061 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Pružná hřídelová spojka $I_{PS} = 3,52 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Převodovka $I_{PR} = 17,67 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Mlecí kolo $I_{MK} = 2458 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$I_{CMK} = I_{HS2} + I_{\frac{O1}{2}} + I_{PS} + I_{PR} + I_{MK} \quad (4.3)$$

$$I_{CMK} = 12,0203 + 1,5061 + 3,52 + 17,67 + 2458$$

$$I_{CMK} = 2492 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.2 Příklad ustáleného běhu

Předpokládejme, že odpor proti pohybu redukovaný na hřídel spojky je $M_O = 5000 \text{ N} \cdot \text{m}$, pak tomuto zatížení odpovídají dle charakteristiky motoru otáčky $n = 1488 \text{ ot/min}$. S těmito hodnotami můžeme vypočítat potřebný koeficient λ pro přenos daného zatížení při odpovídajících otáčkách podle vztahu uvedeného v kapitole 2.2.

Odpor proti pohybu

$$M_O = 5000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Otáčky motoru

$$n = 1488 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

$$M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2$$

$$\lambda = \frac{M_{HS}}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot n^2} = \frac{5000}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1488^2} = 1,055$$

Této hodnotě koeficientu λ odpovídá při stoprocentním naplnění spojky skluz 2 %, ze kterého můžeme vypočítat otáčky na výstupu hydrodynamické spojky.

Skluz

$$s = 2 \%$$

Otáčky motoru

$$n = 1488 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

$$s = \frac{n - n_v}{n}$$

$$n_v = n - s \cdot n = 1488 - 0,02 \cdot 1488 = 1458 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

Otáčky na výstupu hydrodynamické spojky mají hodnotu $n_v = 1458 \text{ ot/min}$.

4.3 Přejchodový děj

Při řešení přechodového děje se vychází ze situace, kterou lze označit „běh naprázdno“, kdy se soustava „pohon“ otáčí synchronními otáčkami $n_s = 1500 \text{ ot/min}$, zatímco soustava „mlecí kolo“ je v klidu, jelikož hydrodynamická spojka je prázdná, tedy skluz je 100% a nepřenáší se krouticí moment, což představuje pravý dolní roh diagramu na obrázku 2.5. V daný moment se začne hydrodynamická spojka naplňovat. To charakterizuje svislá osa zmiňovaného diagramu. S rostoucím naplněním spojka začíná přenášet krouticí moment, soustava „mlecí kolo“ se začne roztáčet, čímž se snižuje skluz. V průběhu naplňování soustava „mlecí kolo“ nabývá na rychlosti a zvyšují se jí otáčky.

Je nutné brát v potaz, že pohon je limitován svým maximem, tedy bodem zvratu, kdy $n = 1419 \text{ ot/min}$, $M_H = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$, jak je zobrazeno na obrázcích 3.1.

Otáčky bodu zvratu

$$n = 1419 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

Moment bodu zvratu

$$M_{ZV} = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n^2$$

$$\lambda = \frac{M_{HS}}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot n^2} = \frac{12835}{2,14 \cdot 10^{-3} \cdot 1419^2} = 2,978$$

Maximální hodnota parametru λ je $\lambda = 2,98$, kterou představuje vodorovná čára v diagramu na obrázku 2.5.

Na diagramu na obrázku 2.5 jsou znázorněny dvě možné cesty procesu naplňování a to „cesta I“ a „cesta II“. Je patrné, že při „cestě I“ dojde k překročení maximální hodnoty parametru λ , tudíž dojde k překročení bodu zvratu na charakteristice motoru a ten se dostane z provozní oblasti do oblasti rozběhu a rozběh bude nestabilní. Při „cestě II“ se motor stále pohybuje v provozní oblasti a rozběh je stabilní. Rozdíl mezi oběma cestami je v rychlosti naplňování. Při „cestě I“ je hydrodynamická spojka naplňována příliš rychle, a proto dojde ke zmiňovaným komplikacím. Proto je nutné stanovit přiměřenou rychlost naplňování tak, aby nebyl překročen bod zvratu a motor se pohyboval v provozní oblasti a rozběh byl stabilní.

Za účelem výpočtu přechodového děje bylo zapotřebí digitalizovat závislost parametru λ na skluzu a naplnění hydrodynamické spojky. Ve výpočtovém programu Excel byla vytvořena tabulka hodnot parametru λ odečtených z diagramu na obrázku 2.5.

skluz\ naplnění	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%	70%	100%
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10%	0	0	0,19	0,29	0,35	0,44	0,52	0,7	0,93	1,41	1,71	2,04	3,35
20%	0	0	0,22	0,36	0,5	0,61	0,74	0,94	1,15	1,54	2,15	2,9	4,81
30%	0	0	0,22	0,36	0,5	0,66	0,9	1,2	1,5	2,07	3,59	4,33	5,45
40%	0	0	0,22	0,36	0,59	0,81	1,13	1,44	2,65	3,79	5,2	5,36	5,81
50%	0	0	0,22	0,4	0,63	0,86	2,15	2,86	4,24	5	5,65	5,79	6,11
60%	0	0	0,22	0,4	0,74	1,86	2,97	3,72	4,79	5,4	5,88	6,09	6,25
70%	0	0	0,22	0,57	1,68	2,5	3,18	4	5	5,5	6,09	6,22	6,31
80%	0	0,07	0,22	0,9	1,68	2,47	3,18	4	5	5,55	6,09	6,18	6,29
90%	0	0,15	0,38	0,85	1,55	2,33	3,02	3,92	5	5,55	6,09	6,18	6,27
100%	0	0,15	0,38	0,77	1,4	2,16	2,83	3,77	5	5,55	6,09	6,18	6,25

Obrázek 4.2 Tabulka hodnot parametru λ

Dále byl vytvořen výpočtový podprogram, který pro libovolnou hodnotu skluzu a naplnění hydrodynamické spojky vypočte hodnotu parametru λ lineární interpolací z tabelových hodnot. Princip interpolace spočívá v tom, že k libovolné hodnotě skluzu či naplnění přiřadíme nejbližší nižší a nejbližší vyšší hodnotu. Například je potřeba zjistit hodnotu λ ve 44 % skluzu a 50% naplnění.

Nejbližší nižší hodnota λ

$$\lambda(40) = 3,79$$

Nejbližší vyšší hodnota λ

$$\lambda(50) = 5$$

$$\lambda(x) = \lambda(\text{nižší}) + [\lambda(\text{vyšší}) - \lambda(\text{nižší})] \cdot \frac{\%(x) - \%(\text{nižší})}{\%(\text{vyšší}) - \%(\text{nižší})} \quad (4.4)$$

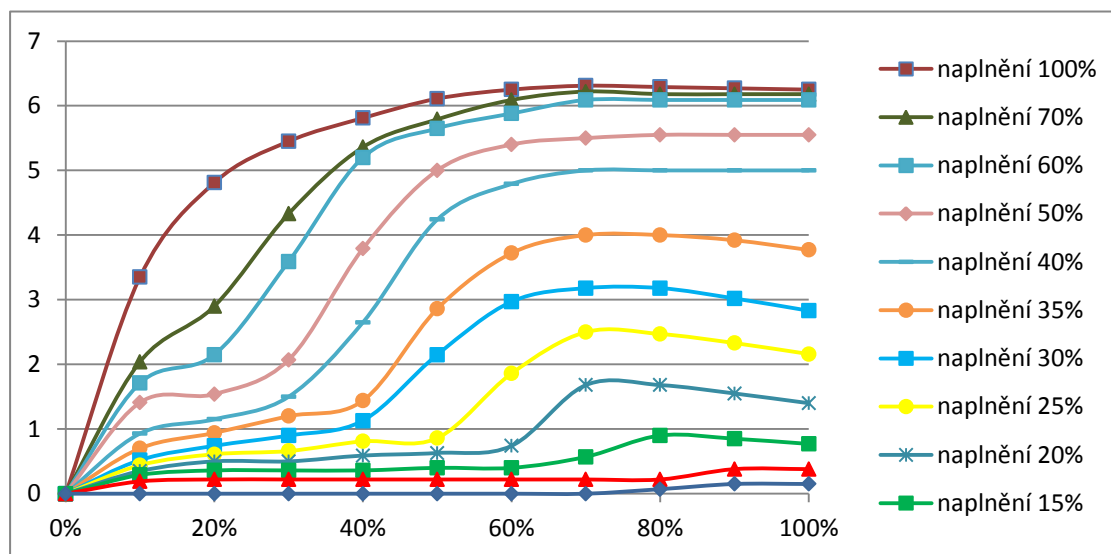
$$\lambda(44) = \lambda(40) + [\lambda(50) - \lambda(40)] \cdot \frac{\%(44) - \%(40)}{\%(50) - \%(40)} =$$

$$\lambda(44) = 3,79 + [5 - 3,79] \cdot \frac{44 - 40}{50 - 40} =$$

$$\lambda(44) = 4,274$$

Interpolací zjištěná hodnota λ ve 44 % skluzu a 50% naplnění má hodnotu $\lambda(44) = 4,544$.

Tento výpočet byl sestaven ve výpočtovém programu Excel pro libovolné hodnoty. Digitalizovaný průběh funkcí je zobrazen v grafu na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Digitalizovaný průběh závislosti parametru λ na naplnění a skluzu [3]

Dále předpokládáme, že naplňování hydrodynamické spojky probíhá rovnoměrně v čase, přičemž spojka se zcela naplní v čase T_{HS} . Hodnota naplnění v závislosti na čase je pak dána lineární funkcí, která platí pro naplnění vyjádřené poměrnou hodnotou rozsahu $\langle 0,1 \rangle$.

$$\text{naplnění}(t) = \frac{t}{T_{HS}} \cdot 1 \quad (4.5)$$

Pro naplnění vyjádřené procenty v rozsahu $\langle 0,100 \% \rangle$ platí:

$$\text{naplnění}(t) = \frac{t}{T_{HS}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Z funkcí lze vidět, že v čase $t = 0$ s budou naplnění rovněž nulové. Pokud $t = T_{HS}$, je zřejmé, že naplnění bude 100%. Obě funkce jsou platné až po maximální naplnění, které činí 100 %. Dále už nestoupají.

4.4 Limit rozběhu

Jak již bylo zmíněno, při rozběhu by se stav motoru daný otáčkami a příslušným hnacím momentem měl pohybovat v provozní oblasti charakteristiky, což je klesající oblast ohraničená bodem zvratu ($n = 1419 \text{ ot/min}$, $M_H = M_{ZV} = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$) a konečným bodem charakteristiky ($n = 1500 \text{ ot/min}$, $M_H = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$). Pokud by se stav motoru pohyboval v jiné než vymezené provozní oblasti, rozběh by byl nestabilní.

Pro stanovení dolního časového limitu rychlosti naplnění je použit maximální moment motoru neboli moment zvratu $M_{ZV} = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$. Tedy uvažujeme, že po celou dobu rozběhu bude soustava „mlecí kolo“ poháněna krouticím momentem rovným momentu zvratu.

Maximální moment

$$M_{Hmax} = M_{ZV} = 12\,835 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Otáčky motoru

$$I_{CMK} = 2492 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{CMK} \cdot \varepsilon_v = M_{Hmax}$$

$$\varepsilon_{v_max} = \frac{M_{Hmax}}{I_{CMK}} = \frac{12835}{2492} = 5,15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Maximální úhlové zrychlení soustavy je tedy $\varepsilon_{v_max} = 5,15 \text{ rad/s}$. Pokud bychom předpokládali rozběh až do jmenovitých otáček $n_N = 1488 \text{ ot/min}$, kterým odpovídá úhlová rychlost:

Otáčky

$$n_N = 1488 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

$$\omega_N = \frac{\pi \cdot n_N}{30} = \frac{\pi \cdot 1488}{30} = 155,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

pak čas rozběhu je:

Jmenovitá úhlová rychlost

$$n_N = 155,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Maximální úhlové zrychlení

$$\omega_N = 5,15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$t_{rL} = \frac{\omega_N}{\varepsilon} = \frac{155,8}{5,09} = 31 \text{ s}$$

Naplňování spojky musí být nastaveno na výrazně delší dobu, protože soustava nebude poháněna maximálním hnacím momentem po celou dobu rozběhu.

4.5 Výpočet přechodového děje

Podstatou samotného výpočtu přechodového děje je numerická integrace pohybové rovnice probíhající v integračních krocích. Pohybový stav na začátku každého kroku je dán mírou naplnění a skluzem, který se vypočte z otáček z předchozího kroku.

Výpočet byl realizován po hladinách naplnění zobrazených v grafu na obrázku 2.5. Výpočet je tedy rozčleněn do 13 kroků včetně počátečních podmínek. V prvních devíti krocích roste naplnění po 5 %, v následujících třech krocích po 10 % a v posledním kroku naplnění vzroste o 30 %. Čas vzrůstu naplnění o 5 % je získán jako podíl celkového času naplnění ku 20, jelikož ve 100 % je 5 % právě dvacetkrát.

Výpočet má formu tabulky, která se skládá ze sedmi sloupců, v nichž je postupně zapsána míra naplnění, skluz, parametr λ , krouticí moment přenášený hydrodynamickou spojkou, úhlové zrychlení mlecího kola, úhlová rychlost mlecího kola a otáčky mlecího kola. Mimo tabulku jsou zapsány ostatní potřebné hodnoty pro výpočet a to: synchronní otáčky, moment setrvačnosti mlecího kola, celkový čas rozběhu a čas kroku neboli integrační krok. Jelikož je čas kroku vypočten z celkového času rozběhu, tabulka je soběstačná a všechny výpočty provede sama. Do výpočtu se zadává pouze celkový čas rozběhu, který musí být stanoven na co nejkratší dobu, ale zároveň hodnoty vypočteného krouticího momentu nesmí překročit moment zvratu.

Otáčky jsou nutné pro výpočet přenášeného krouticího momentu. V průběhu rozběhu otáčky motoru mírně klesnou pod hodnotu synchronních otáček, ale jejich pokles je tak nepatrný, že je možno jej zanedbat a celý výpočet provést se synchronními otáčkami n_s .

Jelikož se soustava rozbíhá z klidu a s nulovým naplněním, tak v prvním řádku jsou všechny veličiny rovny nule mimo skluz, který je 100%, což vychází z diagramu na obrázku 2.5. Dále je nutné podotknout, že parametr λ je pro každý krok vypočtený z úrovně naplnění a skluzu lineární interpolací již zmiňovaným podprogramem. Ostatní výpočty jsou provedeny analyticky pomocí funkcí výpočtového programu Excel.

Jednotlivé výpočty mají tuto podobu:

Skluz:

Synchronní otáčky	n_s
Otáčky z předchozího kroku	n_i

$$s_{i+1} = \frac{n_s - n_i}{n_s} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Krouticí moment:

Parametr λ	λ
Synchronní otáčky	n_s

$$M_{HS} = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda \cdot n_s^2 \quad (4.8)$$

Úhlové zrychlení:

Krouticí moment	M_{HS}
Moment setrvačnosti soustavy	I_{CMK}

$$\varepsilon = \frac{M_{HS}}{I_{CMK}} \quad (4.9)$$

Úhlová rychlost:

Úhlové zrychlení	ε
Čas vzrůstu naplnění o 5 %	Δt
Úhlová rychlost v předchozím kroce	ω_i

V prvních devíti krocích:

$$\omega_{i+1} = \varepsilon \cdot \Delta t + \omega_i \quad (4.10)$$

V následujících třech krocích:

$$\omega_{i+1} = \varepsilon \cdot 2\Delta t + \omega_i \quad (4.11)$$

V posledním kroku

$$\omega_{i+1} = \varepsilon \cdot 6\Delta t + \omega_i \quad (4.12)$$

Otáčky:

Úhlové rychlost	ω_i
-----------------	------------

$$n = \frac{\omega \cdot 30}{\pi}$$

Jak již bylo zmíněno, tyto vzorce byly zformovány do tabulky pomocí výpočtového programu Excel.

Po sestavení tabulky bylo zapotřebí určit nejnižší možný celkový čas rozběhu, při kterém hodnota krouticího momentu nepřesáhne maximální moment tedy moment zvratu M_{ZV} . Jelikož sestavení podprogramu pro tento proces ve výpočtovém programu Excel by bylo příliš náročné, stanovení času se provedlo systematicky několika pokusy do té doby, než byla nalezena nejnižší možná celá časová hodnota, pro kterou nebyl překročen maximální krouticí moment. Pokud by bylo ignorováno omezení na celá čísla, hodnota

doby rozběhu by byla nižší v rámci desetin. Ačkoliv by byla hodnota nižší, následně by byla zaokrouhlena na nejbližší vyšší celé číslo, proto se výpočet omezil jen na celá čísla.

Výsledná tabulka s vypočtenými hodnotami je zobrazena na obrázku 4.5.

Naplnění (%)	Skluz [%]	Lambda	Krouticí moment	Úhlové zrychlení	Úhlová rychlost	Otáčky na výstupu
0	100,00	0	0	0	0	0
5	100,00	0,15	722,25	0,289827448	1,927352528	18,40486092
10	98,77	0,38	1829,7	0,734229535	6,809978933	65,03050857
15	95,66	0,804682938	3874,548346	1,554794681	17,14936356	163,7643589
20	89,08	1,561929111	7520,68867	3,017932853	37,21861704	355,4116126
25	76,31	2,481082323	11946,41138	4,793905049	69,09808561	659,838113
30	56,01	2,642884982	12725,49119	5,106537395	103,0565593	984,1176498
35	34,39	1,30541176	6285,557626	2,522294393	119,829817	1144,290462
40	23,71	1,279988921	6163,146655	2,473172815	136,2764162	1301,343916
50	13,24	1,452168606	6992,191838	2,805855473	157,0796327	1500
60	0,00	0	0	0	157,0796327	1500
70	0,00	0	0	0	157,0796327	1500
100	0,00	0	0	0	157,0796327	1500

Obrázek 4.5 Tabulka rozběhu soustavy „mlecího kola“ bez odporu

Výsledná tabulka vycházela z hodnot pomocné tabulky, kde byly zapsány konstantní veličiny (žlutě), čas rozběhu (zeleně) a délky jednotlivých integračních kroků (červeně).

Synchronní otáčky	Synchronní úhlová rychlost	Moment setrvačnosti	Čas rozběhu (s)	Čas kroku	Čas 2 kroků	Čas 6 kroků
1500	157,0796327	2492	133	6,65	13,3	39,9

Obrázek 4.6 Pomocná tabulka pro rozběh bez odporu

Dále byla vytvořena druhá tabulka výpočtů, která pracuje na stejném principu, ovšem je do ní zaveden i moment odporu M_O . Hodnota momentu odporu nebyla nikterak specifikována, tudíž byla zvolena s ohledem na velikost jmenovitého momentu M_N a to jako jeho přibližná desetina $M_O = 500 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Naplnění (%)	Skluz	Lambda	Krouticí moment	Úhlové zrychlení	Úhlová rychlost	Otáčky na výstupu
0	100,00	0	0	0	0	0
5	100,00	0,15	222,25	0,089185393	0,642134831	6,13
10	99,59	0,38	1329,7	0,53358748	4,483964687	42,82
15	97,15	0,792836645	3317,508444	1,33126342	14,06906131	134,35
20	91,04	1,534349639	6887,893513	2,764002212	33,96987724	324,39
25	78,37	2,474877687	11416,53606	4,581274503	66,95505366	639,37
30	57,38	2,754757296	12764,15638	5,122053123	103,8338361	991,54
35	33,90	1,293535845	5728,375093	2,298705896	120,3845186	1149,59
40	23,36	1,267629231	5603,634748	2,248649578	136,5747956	1304,19
50	13,05	1,449699202	6480,301656	2,600442077	157,0796327	1500,00
60	0,00	0	0	0	157,0796327	1500,00
70	0,00	0	0	0	157,0796327	1500,00
100	0,00	0	0	0	157,0796327	1500,00

Obrázek 4.7 Tabulka rozběhu soustavy „mlecího kola“ s odporem

Pomocná tabulka pro rozběh s odporem:

Moment odporu	Synchronní otáčky	Moment setrvačnosti	Čas rozběhu (s)	Čas kroku	Čas 2 kroků	Čas 6 kroků
500	1500	2492	144	7,2	14,4	43,2

Obrázek 4.8 Pomocná tabulka pro rozběh s odporem

5. Rozbor výsledků numerického řešení

Ze zobrazených tabulek v minulé kapitole vyplývá, že nejkratší doba rozběhu pro rozběh bez momentu odporu je $T_{HS1} = 133$ s. Při rozběhu, kde byly uvaženy pasivní odpory, vzrostla doba rozběhu na $T_{HS2} = 144$ s. Tyto hodnoty je ale nutné brát s rezervou, jelikož výpočet je zatížen chybami jako odečítání hodnot parametru λ z grafu nebo interpolace hodnot parametru λ pro libovolnou hodnotu skluzu. I přesto, že výpočet to ovlivní jen velmi málo, je třeba brát jako chybu uvažování, že motor bude pohánět soustavu po celou dobu rozběhu synchronními otáčkami.

Do rozběhu soustavy je třeba uvažovat i rozběh motoru, proto rozběh celé soustavy je dán součtem „rozběhu na prázdko“ a „rozběhu mlecího kola“. Vyjádřeno rovnicí:

$$T_1 = t_r + T_{HS1} = 0,62 + 133 = 133,62 \cong 134 \text{ s} \quad (5.1)$$

pro rozběh bez odporu

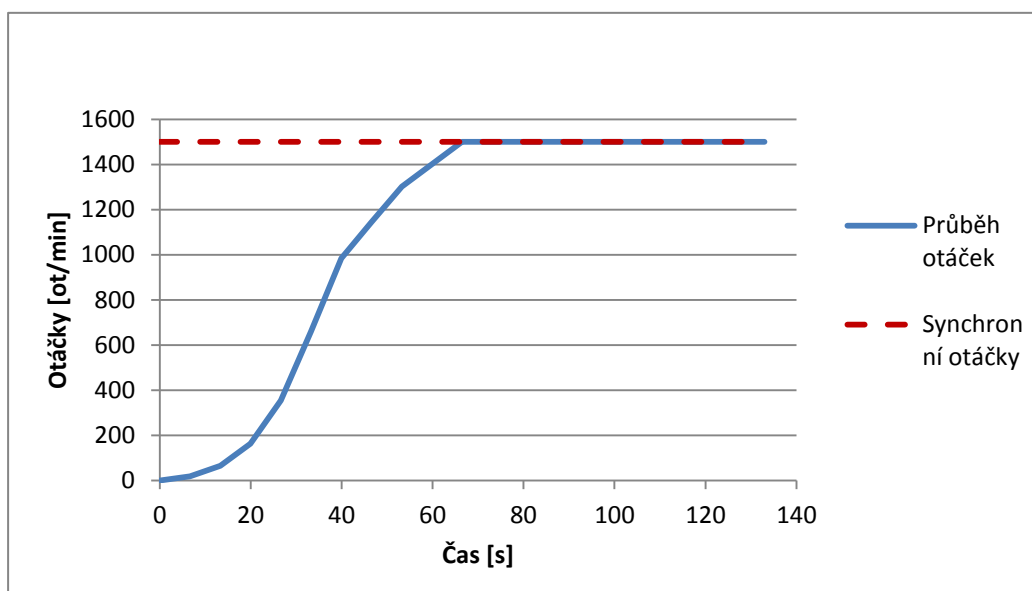
$$T_2 = t_r + T_{HS2} = 0,62 + 144 = 144,62 \cong 145 \text{ s} \quad (5.2)$$

pro rozběh s odporem.

Na dalších stránkách jsou zobrazeny charakteristické veličiny rozběhu v grafech.

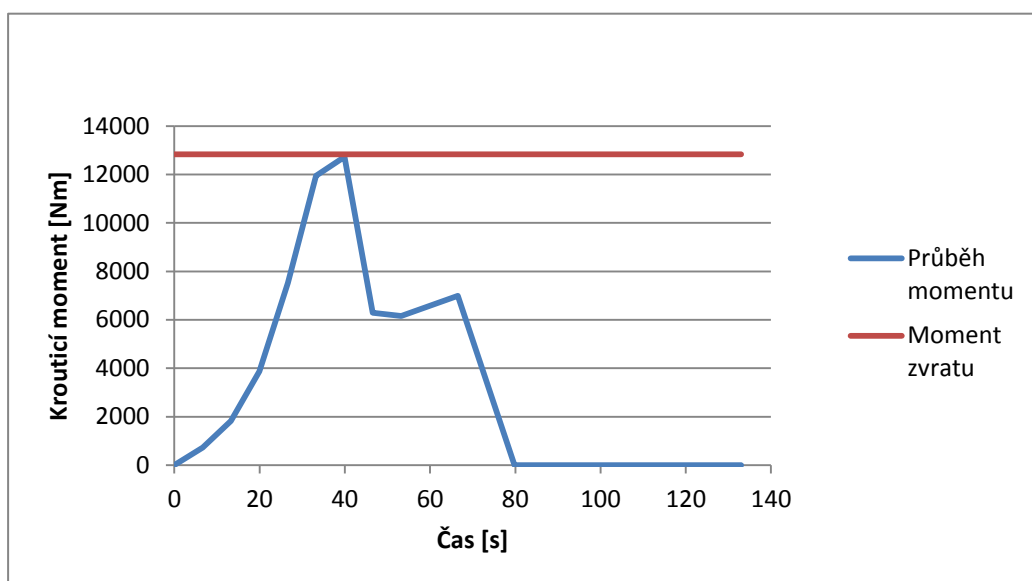
Pro rozběh bez odporu:

V následujícím grafu je zobrazena závislost otáček na čase. Jak je možné pozorovat, k ustálení chodu na synchronních otáčkách dojde kolem 70. sekundy rozběhu.



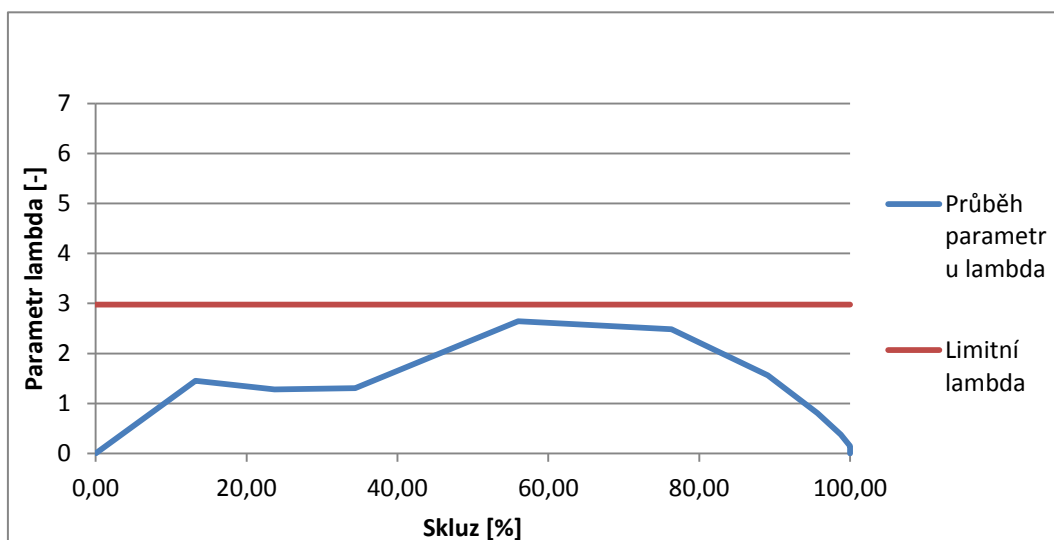
Obrázek 5.1 Závislost otáček na čase

V grafu níže je zachycen průběh krouticího momentu. Z grafu je patrné, že kolem 40. sekundy rozběhu se krouticí moment výrazně přiblíží hodnotě momentu zvratu. Z výpočtové tabulky však lze odečíst, že hodnota největšího momentu je $M = 12\,726\text{ N} \cdot \text{m}$, která je nižší než hodnota momentu zvratu $M_{ZV} = 12\,835\text{ N} \cdot \text{m}$.



Obrázek 5.2 Závislost krouticího momentu na čase

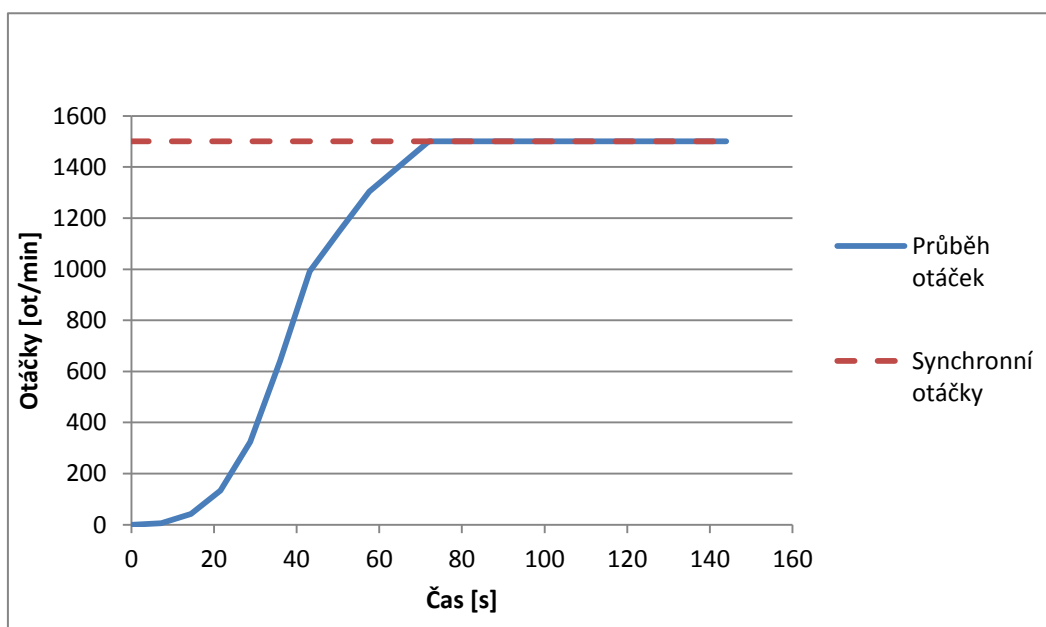
V dalším grafu je zachycena závislost parametru λ na hodnotě skluzu. Opět je patrné, že se parametr λ nepřekročí limitní hodnotu.



Obrázek 5.3 Závislost parametru lambda na skluzu

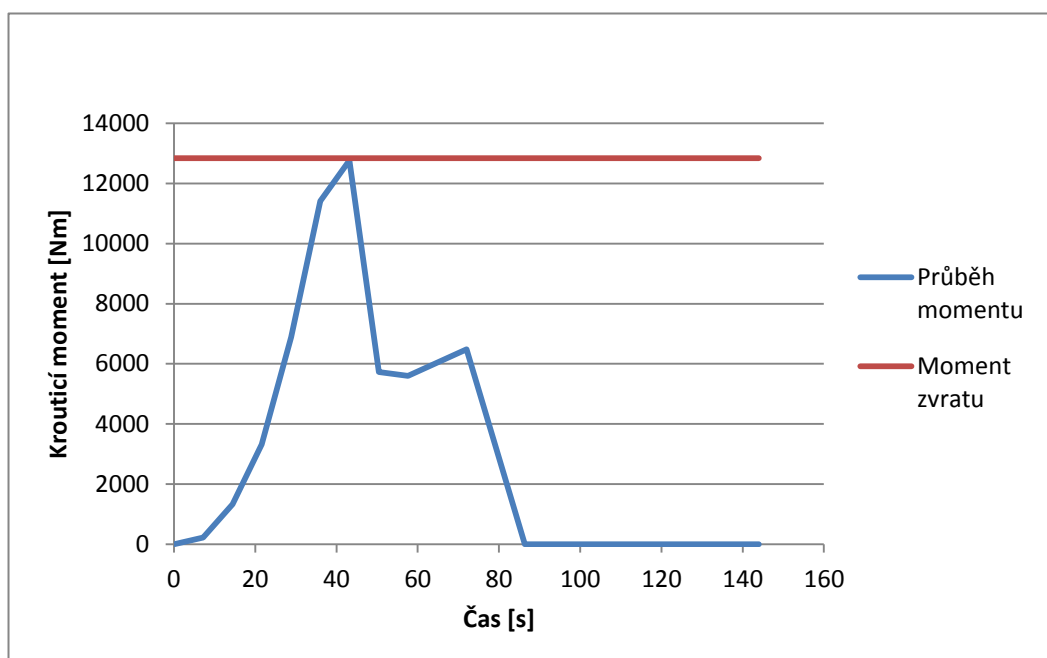
Pro rozběh s odporem:

U rozběhu s odporem dojde k ustálení otáček na synchronních otáčkách kolem 70 sekundy.

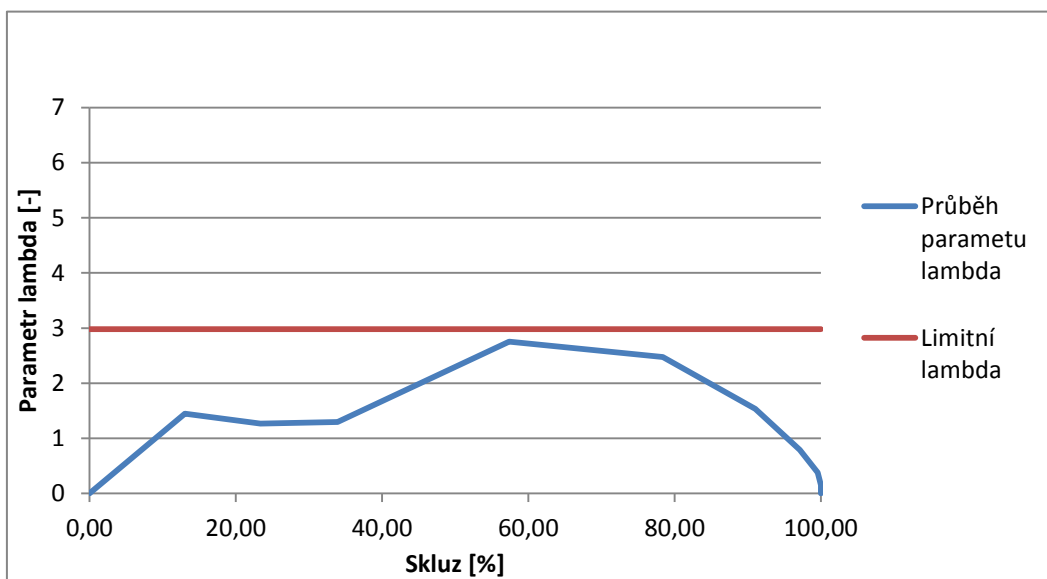


Obrázek 5.4 Závislost otáček na čase

Maximální hodnota momentu při rozběhu s odporem je $M = 12\,765\text{ N} \cdot \text{m}$.



Obrázek 5.5 Závislost kroucího momentu na čase



Obrázek 5.6 Závislost parametru lambda na skluzu

6. Závěr

Předmětem bakalářské práce je analýza rozběhu mlecího kola elektrárny. Soustava se skládá z elektromotoru, pružné spojky, hydrodynamické spojky, další pružné spojky, převodovky a samotného mlecího kola. Podstatou analýzy je chování hydrodynamické spojky během jejího naplňování. Cílem práce je stanovit nejkratší čas rozběhu soustavy.

Analýza byla rozdělena do dvou částí a to „rozběh na prázdkno“ a „rozběh mlecího kola“. Pro výpočet „rozběhu na prázdkno“ byl sestaven jednohnotový výpočtový model, který představuje motor, pružnou spojku a vstupní kolo hydrodynamické spojky. „Rozběh na prázdkno“ byl nejdříve řešen přibližným výpočtem, kde se předpokládal konstantní hnací moment a rovnoměrně zrychlený pohyb. Přibližným výpočtem byl zjištěn čas rozběhu $t_r = 0,678 \text{ s}$, což představuje dobu, za kterou se pohon ustálí na synchronních otáčkách $n_s = 1500 \text{ ot/min}$. Poté byl realizován přesný výpočet, ve kterém byl zahrnut vliv momentové charakteristiky pohonu, tedy soustava nebyla po celou dobu rozběhu poháněna stejným momentem a jednalo se o nerovnoměrný rozběh soustavy. Pro přesný výpočet bylo nutné aproximovat a digitalizovat momentovou charakteristiku pohonu, aby bylo možné získat hodnotu hnacího momentu pro libovolné otáčky. Numerickou integrací byla následně zjištěna doba rozběhu $t_r = 0,62 \text{ s}$.

Při řešení „rozběhu mlecího kola“ byl definován dvouhnotový výpočtový model, který byl tvořen soustavou pohonu na jedné straně a soustavou mlecího kola na straně druhé. „Rozběh mlecího kola“ je přímo závislý na funkci hydrodynamické spojky, konkrétně na jejím naplnění a skluzu. Tuto závislost představuje parametr λ , jehož grafický záznam je v práci zobrazen. Podobně jako u „rozběhu na prázdkno“ bylo nutné tento záznam digitalizovat. Následně byl vytvořen výpočtový podprogram, který pro libovolnou hodnotu skluzu a naplnění vypočte hodnotu parametru λ pomocí lineární interpolace z tabelových hodnot. Poté byl proveden výpočet limitu rozběhu, který představoval situaci, za které by byla soustava poháněna maximálním momentem po celou dobu rozběhu. Tento výpočet stanovil dolní hranici doby rozběhu $t_{rL} = 31 \text{ s}$.

Samotný výpočet „rozběhu mlecího kola“ byl opět řešen numerickou integrací. Výpočet má formu tabulky a byl proveden po hladinách naplnění zobrazených v grafu průběhu parametru λ . Hlavními vstupními parametry tabulky bylo zmíněné naplnění hydrodynamické spojky a celkový čas rozběhu. Systematickým odhadováním celkového času rozběhu byla získána nejnižší celá časová hodnota rozběhu soustavy, při čemž musela

být splněna podmínka, že krouticí moment vypočtený pro jednotlivé úrovně hladin naplnění nepřekročí maximální hodnotu krouticího momentu, a tudíž rozběh bude plynulý. Výpočet byl proveden pro situaci bez pasivních odporů a rovněž pro situaci s uvážením pasivních odporů. Doba rozběhu soustavy mlecího kola bez uvážení pasivních odporů byla stanovena na $T_{HS1} = 133$ s. Při uvážení pasivních odporů doba rozběhu soustavy vzrostla na $T_{HS2} = 144$ s. Po sečtení časů „rozběhu na prázdkno“ a „rozběhu mlecího kola“ byla získána celková celá hodnota času rozběhu celé soustavy $T_1 = 134$ s pro rozběh bez uvážení pasivních odporů a $T_1 = 145$ s pro rozběh s uvážením pasivních odporů. Jelikož je výpočet zatížen chybami, doporučuje se zvolit čas rozběhu o něco vyšší, než jsou výsledné hodnoty.

7. Seznam použité literatury

- [1] BROUSIL, J., SLAVÍK J., a ZEMAN. V. *Dynamika*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1989, 327 s. ISBN 80-03-00164-1.
- [2] Juliš, K., Brepta, R.: *Mechanika II. díl*, Dynamika. SNTL, Praha, 1987
- [3] PODEŠVA, Jiří. *Dynamická analýza pohonu mlecího kola*. Ostrava, 2011, 23 s.
- [4] VITÁSEK, E. *Numerické metody*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [5] KUČERA, R., MORÁVKOVÁ Z. *Numerická matematika* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~kuc14/textyNM/FINALNI_VERZE_CD.pdf
- [6] Tepelná elektrárna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_elektr%C3%A1rna
- [7] Proces výroby v uhelných elektrárnách. *Cez* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/uhelne-elektřarny/flash-model-jak-funguje-uhelna-elektřarna.html>
- [8] Spojka (stroj). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Spojka_\(stroj\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Spojka_(stroj))
- [9] Pružné spojky. *Vuts* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/pruzne-spojky.html>
- [10] *Pružné spojky* [online]. Brno: Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, 2013 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_14-09.pdf
- [11] Hydrodynamický měnič točivého momentu. *Suvik* [online]. Praha [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://suvik.cz/clanky/hydromenic.html>

- [12] Hydrodynamické regulační spojky typu KSL pro regulaci výkonu ventilátorových mlýnů. *Tespo-eng* [online]. Brno [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://tespo-eng.cz/cs/hydrodynamicke-regulacni-spojky-ksl-pro-regulaci-vykonu-ventilatorovych-mlynu>
- [13] Hydrodynamická spojka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydrodynamick%C3%A1_spojka

Obrázky:

- [1.1] Schéma tepelné elektrárny. In: *Energyweb* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/EE/images/02/23_schema_tep_el.jpg
- [2.2] Pružná spojka s hadovitou pružinou. In: *Uvp3d* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST26_012.jpg
- [2.3] Pružná spojka typu ARCUSAFLEX AC8. In: *Reich-kupplungen* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.reich-kupplungen.com/cache/com_zoo/images/arcusaflex_reich_kupplungen_big_6d8d71d4336e595dbb11464bdbdb79dc.jpg
- [2.4] Hydrodynamická spojka KSL. In: *Tespo-eng* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://tespo-eng.cz/images/zpravy/18-hydrodynamicke-regulacni-spojky-ksl-pro-regulaci-vykonu-ventilatorovych-mlynu/hydraulicka-regulacni-spojka-ksl-1.jpg>
- [2.5] Průběh funkcí. In: *Vsb* [online]. Ostrava [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/ZaklInfSbirka/TEOROZ/Jine/Image2.gif>

8. Seznam příloh

Příloha A: Zkrácená tabulka výpočtu „rozběhu na prázdnou“

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své poděkování doc. Ing. Jiřímu Podešvovi, Ph.D., za jeho cenné rady, trpělivost a ochotu při vedení mé bakalářské práce.

Přílohy

Příloha A

Čas	Úhel natočení	Úhlové zrychlení	Úhlová rychlost	Otáčky/min	Mh	Mh - 1. usek	2. usek	3. usek
0	0	250,627004	0	0	6161,29	6161,289	172184	0,00235
0,001	0,000125314	250,4352981	0,250627004	2,3933116	6156,58	6156,5762	171266	-9424
0,002	0,000501158	250,2446824	0,501062302	4,7847925	6151,89	6151,8902	170351	-18778
0,003	0,001127343	250,0551529	0,751306985	7,1744532	6147,23	6147,2309	169440	-28062
0,004	0,002003677	249,8667056	1,001362137	9,562304	6142,6	6142,5982	168534	-37276
0,005	0,003129973	249,6793366	1,251228843	11,948355	6137,99	6137,992	167631	-46422
0,006	0,004506041	249,4930419	1,50090818	14,332617	6133,41	6133,4122	166732	-55498
0,007	0,006131696	249,3078178	1,750401221	16,7151	6128,86	6128,8587	165836	-64506
0,008	0,008006751	249,1236604	1,999709039	19,095815	6124,33	6124,3315	164945	-73446
0,009	0,010131022	248,9405658	2,2488327	21,47477	6119,83	6119,8304	164057	-82317
0,01	0,012504325	248,7585303	2,497773266	23,851978	6115,36	6115,3553	163174	-91122
0,011	0,015126478	248,57755	2,746531796	26,227447	6110,91	6110,9062	162294	-98859
0,012	0,017997298	248,3976212	2,995109346	28,601187	6106,48	6106,4829	161418	-108529
0,013	0,021116606	248,2187403	3,243506967	30,97321	6102,09	6102,0854	160545	-117133
0,014	0,024484223	248,0409034	3,491725707	33,343524	6097,71	6097,7135	159677	-125670
0,015	0,028099969	247,8641069	3,739766611	35,712141	6093,37	6093,3673	158812	-134142
0,016	0,031963667	247,6883472	3,987630718	38,079068	6089,05	6089,0465	157950	-142548
0,017	0,036075142	247,5136206	4,235319065	40,444318	6084,75	6084,7511	157093	-150889
0,018	0,040434218	247,3399235	4,482832685	42,807899	6080,48	6080,481	156239	-159164
...
0,415	20,36682377	237,6419874	97,34019222	929,53037	5842,07	5842,0718	7876,91	-448399
0,416	20,46428278	237,7374677	97,57783421	931,79968	5844,42	5844,419	7821,13	-445393
0,417	20,56197948	237,8334903	97,81557167	934,0699	5846,78	5846,7796	7766,4	-442385
0,418	20,65991397	237,9300553	98,05340516	936,34105	5849,15	5849,1535	7712,7	-439375
0,419	20,75808634	238,0271627	98,29133522	938,61311	5851,54	5851,5408	7660,03	-436362
0,42	20,85649669	238,1248124	98,52936238	940,8861	5853,94	5853,9413	7608,39	-433346
0,421	20,95514512	238,2230045	98,7674872	943,16003	5856,36	5856,3552	7557,78	-430329
0,422	21,05403172	238,3217389	99,0057102	945,43489	5858,78	5858,7825	7508,19	-427309
0,423	21,15315659	238,4210156	99,24403194	947,71107	5861,22	5861,223	7459,62	-424288
0,424	21,25251983	238,5208346	99,48245295	949,98745	5863,68	5863,6769	7412,06	-421265
0,425	21,35212154	238,6211196	99,72097379	952,26515	5866,14	5866,1442	7365,52	-418240
0,426	21,45196183	238,7220997	99,95959498	954,54382	5868,62	5868,6247	7319,98	-415213
0,427	21,55204078	238,8230807	100,1983171	956,82345	5871,10	5871,1086	7275,45	-412186
0,428	21,65238707	238,9240617	100,4372656	959,10208	5873,58	5873,5874	7231,66	-409159
0,429	21,75302822	239,0250427	100,6765181	961,38071	5876,06	5876,0629	7188,11	-406132
...
0,611	44,95389262	29,68962882	156,9709432	1498,9621	729,875	6765,3935	15371,5	729,875
0,612	45,11087841	25,40887399	157,0006329	1499,2456	624,639	6765,9933	15380,1	624,639
0,613	45,26789174	21,729067	157,0260417	1499,4882	534,177	6766,5068	15387,4	534,177
0,614	45,42492865	18,57027704	157,0477708	1499,6957	456,522	6766,9459	15393,7	456,522
0,615	45,5819857	15,861983	157,0663411	1499,8731	389,943	6767,3212	15399	389,943
0,616	45,73905998	13,54231403	157,0822031	1500,0245	332,917	6767,6419	15403,6	332,917
0,617	45,89614895	11,55724191	157,0957454	1500,1539	284,117	6767,9156	15407,5	284,117
0,618	46,05325048	9,859771359	157,1073026	1500,2642	242,388	6768,1493	15410,8	242,388
0,619	46,21036271	8,409158714	157,1171624	1500,3584	206,727	6768,3487	15413,7	206,727
0,62	46,36748407	7,170177877	157,1255716	1500,4387	176,268	6768,5187	15416,1	176,268